



Modelisation physique pour la planification de saisie avec une main articulée

A. Joukhadar, C. Bard

► To cite this version:

A. Joukhadar, C. Bard. Modelisation physique pour la planification de saisie avec une main articulée.
RR-2247, INRIA. 1994. inria-00074424

HAL Id: inria-00074424

<https://inria.hal.science/inria-00074424>

Submitted on 24 May 2006

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.

***Modélisation Physique pour la Planification de Saisie
avec une Main Articulée***

Ammar Joukhadar et Christian Bard

N° 2247

Avril 94

PROGRAMME 4

Robotique,
image
et vision ***apport
de recherche*****1994**

Modélisation Physique pour la Planification de Saisie avec une Main Articulée

Ammar Joukhadar* et Christian Bard**

Programme 4 — Robotique, image et vision
Projet SHARP

Rapport de recherche n° 2247 — Avril 94 — 66 pages

Résumé : Planifier des opérations de saisie robustes, comprenant une main articulée robotique et un objet placé dans un environnement en trois dimensions, demande de combiner deux types de techniques : l'une basée sur un raisonnement géométrique capable de fournir une stratégie de saisie (pré-configuration de la main, paramètres de saisie, type de mouvement à exécuter) et une analyse physique des interactions main/objet, l'autre étant absolument nécessaire pour conclure sur la faisabilité d'une stratégie de saisie choisie (la stabilité en particulier), et pour déterminer le type de contrôle à appliquer sur la main. Le sujet de ce rapport est de proposer une nouvelle technique, basée sur le concept de "modèle physique" pour résoudre ce problème. Nous allons montrer comment les modèles physiques peuvent être construits et utilisés pour résoudre les problèmes de stabilité et de stratégie de contrôle.

Mots-clé : planification de saisie, main articulée, modèles physiques.

(Abstract: pto)

*Email : Ammar.Joukhadar@imag.fr

**Email : Christian.Bard@imag.fr

Grasp planning with a dextrous hand using physical models

Abstract: Planning robust grasping operations involving a dextrous robotics hand and an object located in a three dimensional workspace requires to combine two main types of techniques: a geometric based reasoning aimed at producing a grasping strategy (preshape of the hand, grasping parameters, type of motion to execute), and a physical analysis of the object/hand interactions. The second type of technique is clearly necessary to conclude on the feasibility of the chosen grasping strategy (stability in particular) and to determine the type of control to apply onto the hand. The purpose of this paper is to propose a new technique based upon the concept of “physical models” for solving this problem. We will show how physical models can be constructed and used to solve the associated stability and control strategy problems. We will also show how the related techniques has been combined with more classical geometric methods to solve the whole problem.

Key-words: grasp planning, dextrous hand, physical models.

Table des matières

1	Introduction	8
1.1	Présentation générale du problème	8
1.2	Synthèse de l'approche	11
1.2.1	Le planificateur de pré-configuration	11
1.2.2	Le planificateur physique	13
2	Analyse du problème	15
2.1	Problématique de la saisie par une main robotique	15
2.1.1	Le problème de base	15
2.1.2	Interactions main/objet	16
2.1.2.1	Analyse de “stabilité statique”	16
2.1.2.2	Analyse des conditions de “stabilité par compliance”	19
2.1.3	Problèmes ouverts	20
2.2	Les modèles physiques	22
2.2.1	Principe des modèles physiques	22
2.2.2	La modélisation physique : le modèle des ressorts	22
2.2.2.1	Le modèle des ressorts	23
3	Modélisation des interactions main/objet par utilisation de modèles physiques	26
3.1	Principales étapes du processus	26
3.2	Modélisation Physique	27
3.2.1	Principe de base	27
3.2.2	Représentation du modèle $R\phi$	28
3.2.2.1	Discrétisation structurelle	28

3.2.2.2	Relations entre particules	29
3.2.3	Le mouvement	35
3.2.3.1	Discrétisation de la loi générale de la dynamique . . .	35
3.2.3.2	Complexité	36
3.2.3.3	Choix du pas d'échantillonnage Δt	36
3.2.4	Interactions entre les objets	38
3.2.4.1	La collision	38
3.2.4.2	Le frottement	42
3.2.4.3	La viscosité du milieu	44
3.2.4.4	Choix de la valeur de la viscosité	44
3.2.5	Exemples de représentation des objets	45
3.2.6	Représentation d'une main articulée	47
3.3	Implantation et expérimentation	47
3.3.1	Validation expérimentale	47
3.4	Identification des paramètres du modèle	49
4	La saisie par une main articulée	52
4.1	Introduction	52
4.2	Description "physique" de tâches de manipulation	53
4.3	La stabilité d'une prise	55
4.3.1	Stabilité palmaire	56
4.3.2	Stabilité du bout des doigts	56
4.3.3	Contacts non prévus	57
4.4	Modélisation des contraintes du planificateur de pré-configuration . . .	58
4.4.0.1	Exemple sur une sphère et un cylindre	60
4.4.0.2	Expérimentation	61
5	Conclusion	63

Table des figures

1.1	Une main articulée : la main de “Salisbury”.	9
1.2	Exemple de reconstruction d’un anneau par le planificateur de pré-configuration. Il utilise en entrée, aussi bien un modèle CAO classique (a), qu’un modèle volumique (octree) issue de capteurs extéroceptifs (b). Il reconstruit des informations pertinentes pour la saisie, comme les protubérances de l’objet, sous la forme de cylindres elliptiques, avec leurs accès possibles. La discrétisation utilisée dépend de la grosseur d’un doigt.	11
1.3	Exécution d’une pré-configuration pulpaire pour un cylindre posé sur deux supports, avec la main de Salisbury (à poste fixe).	13
2.1	Condition de non glissement. La force appliquée $\vec{F}$ doit être dans le cône de friction.	16
2.2	Condition de saisie pour deux contacts ponctuels.	18
2.3	Étapes de saisie avec “compliance” [Mason 82]. (a)-(b) l’outil arrive vers l’objet jusqu’au contact, (c) l’objet bouge (compliance de l’objet par rapport à l’outil), (d)-(e) l’outil referme ses mors un par un (compliance de l’outil par rapport à l’objet).	19
2.4	Exemples de contacts non ponctuels à considérer.	20
2.5	Modèle d’un matériau à base de ressorts.	23
2.6	Variation de l’énergie W de deux ressorts A et B en fonction de leur allongement Δd ($\lambda_A > \lambda_B$).	24
2.7	Discrétisation structurelle d’un objet physique [Cordis-Anima].	25
2.8	Une représentation d’un terrain par modèle physique.	25
3.1	Discrétisation d’un cube en sphères.	28
3.2	Relation de type LS . Cette relation a un comportement linéaire.	30
3.3	La relation $\vec{F} = -\lambda \Delta \vec{P}$ tend à fixer la distance entre deux particules, c’est pourquoi ces deux chaînes sont deux représentations du même objet : la distance entre particules est respectée, mais pas l’orientation.	30
3.4	Relations croisées : une masse est en relation avec trois autres masses pour fixer tous ses degrés de liberté.	30
3.5	Utilisation de masses fictives pour obtenir la linéarité d’une tige.	31
3.6	Relation de type TS . Cette relation est munie d’un amortisseur angulaire.	32
3.7	Une représentation possible d’une tige rigide.	33
3.8	Action du facteur de rigidité λ sur le mouvement d’un élément autour de sa position d’équilibre ($\mu \neq 0$).	34

3.9	Action de la viscosité interne μ sur le mouvement d'un élément autour de sa position d'équilibre.	34
3.10	Construction des articulations: (a) modélisation d'une articulation en translation, (b) modélisation d'une articulation en rotation. l représente la valeur de la translation et θ est la valeur angulaire de la rotation. . .	35
3.11	(a) Deux étapes de mouvement à $\frac{\Delta t}{2}$. (b) Une seule séquence à Δt . Dans le cas (b), la position n'est pas cohérente: la relation entre les deux premières masses est déformée.	37
3.12	Force de collision.	39
3.13	Décomposition hiérarchique d'un objet en sphères.	40
3.14	Algorithme "Localiser_Contact"	40
3.15	Représentation du frottement entre deux masses ponctuelles. $\vec{F}_n$ est la force normale appliquée au centre des sphères et $\vec{F}_f$ est la force de frottement.	43
3.16	Forces de viscosité qui agissent sur un cylindre en chute libre.	45
3.17	Représentation possible d'une plaquette. Deux relations de type TS entre la masse centrale et ses quatre voisins ont été enlevées par redondance.	46
3.18	Une représentation d'une articulation simple. L'angle initial θ_o de TS^* est différent de 180° : c'est la seule différence avec la représentation d'une tige rigide.	46
3.19	Traction d'une tige.	47
3.20	Flexion d'une tige.	48
3.21	Décomposition de la chute d'une tige (avec vitesse initiale), et interaction avec le sol.	48
3.22	Roue subissant la force de pesanteur. L'effet de la rotation est dû aux frottements avec le sol incliné.	48
3.23	Glissement d'une balle au moment de la saisie avec une main articulée. Glissement causé, soit par de mauvais paramètres de contrôle (ici, les paramètres liés à la friction), soit par une mauvaise configuration initiale avant la saisie.	49
3.24	Re-positionnement de la main avant la saisie. Ce re-positionnement entraîne une saisie palmaire.	50
3.25	Saisie pulpaire d'une balle. Les paramètres liés à la friction ont été augmentés.	50
3.26	Une mauvaise représentation d'une plaque.	51
4.1	Déplacement "physique" d'un objet.	53
4.2	Planification physique du mouvement d'une main articulée attirée par des bouts de doigts fictifs.	54
4.3	Planification du mouvement global objet/main, sous la contrainte d'attraction de l'objet saisi vers une position voulue. L'objet fictif possède une "masse infinie" et les articulations sont passives.	55
4.4	Relations de type LS entre les points de contact pour garantir que la somme des forces extérieures soit nulle.	57

4.5	En assurant que la somme des forces extérieures est nulle à chaque instant, le centre d'inertie de l'objet ne bouge pas. L'objet ne peut que tourner autour de son centre d'inertie jusqu'à une position d'équilibre. .	57
4.6	Les étapes de la stabilité: (E_1) la main s'approche au contact de l'objet, (E_2) compliance de l'ensemble main/objet.	59
4.7	Description des étapes de liaisons sur une sphère et un cylindre, pour des saisies sphérique et cylindrique du bout des doigts.	60
4.8	Les relations LS dépendent du type de contact souhaité: (a) contact Bt , (b) contact Pu , (c) contact Pa . Chaque LS_i correspond en fait à trois LS . .	61
4.9	Simulation de la saisie par le bout des doigts d'une sphère, posée sur une table, subissant la force de gravité. La sphère, après quelques instants, subit le contact des doigts et glisse.	62

Chapitre 1

Introduction

Pour des concepts tels que la programmation de niveau tâche et l'autonomie en robotique, l'utilisation en extrémité d'un bras manipulateur, d'un outil de préhension de type main articulée (comme la main de Salisbury [19], figure 1.1) présente des avantages certains :

- elle permet la réalisation de différentes variétés de tâches (y compris des tâches de manipulations fines, comme l'assemblage ou la maintenance) sans multiplication des dispositifs matériels.
- elle augmente la sûreté de fonctionnement par le fait qu'un fonctionnement dégradé est envisageable (i.e la saisie avec seulement deux doigts est possible).

Cependant, à l'heure actuelle, si de telles mains existent, leur utilisation est difficile à cause des dispositifs de commande de bas niveau qui leur sont associés : il semble en effet difficile de spécifier une tâche, même simple, en donnant les valeurs successives des articulations des différents doigts. La difficulté s'accroît si de plus, cette main est portée par un robot. Il s'agit non seulement de planifier la saisie avec une main articulée, mais aussi de gérer la planification du mouvement main+robot, pour parfaire la faisabilité de la tâche. Pour une main telle que celle montrée en figure 1.1, il est nécessaire de contrôler 9 degrés de liberté.

L'utilisation de telles "mains" ne peut donc se faire raisonnablement sans automatisation logicielle. Nous nous proposons ici, d'étudier certains aspects de l'automatisation de la tâche de préhension, et notamment **l'interaction entre les objets et les doigts de la main au moment de la phase de fermeture des doigts sur l'objet**. Elle constitue un pré-requis à l'automatisation de la quasi-totalité des autres tâches et notamment de la manipulation.

1.1 Présentation générale du problème

Jusqu'à présent, nous nous sommes efforcés de simplifier la tâche de préhension en nous inspirant de la saisie humaine et notamment de l'une de ses phases, "la pré-configuration" [10]. Elle consiste à préparer la main à la forme de l'objet à saisir. Cette phase implique une connaissance morphologique de l'objet, c'est-à-dire essentiellement

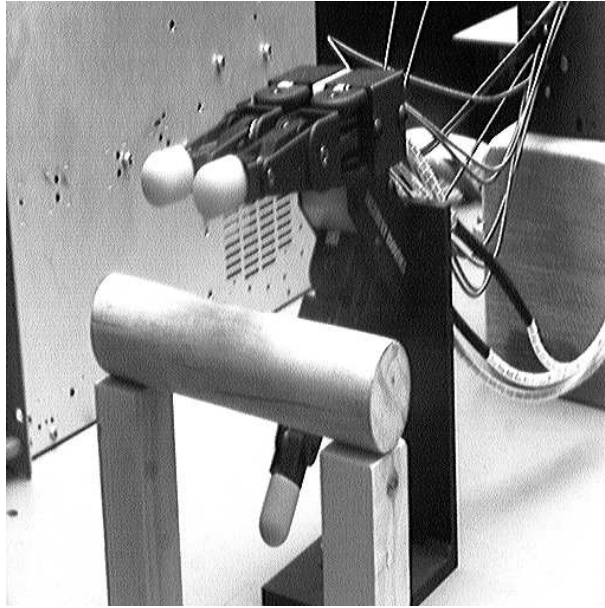


FIG. 1.1 - : Une main articulée : la main de “Salisbury”.

la connaissance de sa taille et de sa forme. Le but n'est pas de connaître très exactement la position finale de chaque doigt sur l'objet. En effet, cette tâche est pratiquement impossible à concrétiser, du fait des incertitudes au moment de l'exécution effective de la prise. Il s'agit seulement d'obtenir après une analyse morphologique, une région où il serait potentiellement intéressant de positionner les doigts. Il est intéressant de connaître une telle région pour une complète compatibilité avec la tâche à effectuer et pour une adaptation indispensable au moment de la saisie effective.

La pré-configuration sert naturellement d'initialisation à la phase d'interaction (ou de fermeture). En effet, les informations initiales nécessaires à l'étude de l'interaction main/objets sont les suivantes :

1. Une connaissance des positions initiales des doigts autour de l'objet (ou de la région à saisir), qui dépendent de la morphologie et qui sont compatibles avec la tâche à effectuer.
2. Une connaissance des mouvements et forces initiales des doigts qui vont à la rencontre de l'objet à saisir. Ces informations sont contenues dans une analyse de pré-configuration : on ne referme pas les doigts de la même manière pour une prise avec le bout des doigts que pour une avec la pulpe des doigts (cf. 2.1).

Dans une étude de pré-configuration, si des connaissances géométriques sur l'objet peuvent suffire pour engendrer une pré-configuration des doigts autour d'une région de l'objet, ce n'est plus le cas si l'on veut prendre en compte les interactions entre les différents corps en présence : on ne peut pas saisir un objet sans connaître certains “*attributs physiques*” comme sa masse, sa rigidité, pour s'assurer de la cohérence de la fermeture des doigts sur l'objet, c'est-à-dire engendrer une complète *stabilité*.

De nombreux attributs physiques peuvent être associés à un objet du monde physique.

En effet, chaque objet possède des propriétés qui rendent compte de comportement particuliers de cet objet face à des actions qu'on lui fait subir. Si on s'intéresse à des forces extérieures, la rigidité et l'élasticité font partie des aspects physiques à considérer pour étudier le mouvement et la déformation des objets par rapport aux dites forces (c'est le cas pour la saisie).

Cependant, si certains de ces aspects restent constants dans le temps ou dans les actions envisagées, d'autres évoluent : par exemple, le fer change sa rigidité, son élasticité et/ou sa dureté sous l'effet d'un changement brutal de température. Les propriétés physiques et leurs évolutions sont le résultat de plusieurs facteurs qui définissent l'objet : le type des atomes qui construisent une particule de la matière, les structures géométriques formées par ces particules, l'histoire thermique de l'objet, et la densité des particules : quelques propriétés physiques sont ainsi représentées par des données statistiques [5]. Par conséquent, il est très difficile d'obtenir un modèle informatique capable de présenter toutes les propriétés d'un objet donné. On doit se contenter de représenter quelques propriétés physiques dans des conditions bien connues. Dans ce rapport, nous mettons en évidence les modèles permettant de décrire la réaction mécanique des objets en relation avec des forces extérieures, afin de prédire leurs mouvements. Ces modèles sont utilisés pour prédire explicitement l'interaction main/objet, et nous aider ainsi à évaluer une opération de saisie plus efficace et plus sûre en relation avec un planificateur de "pré-configuration".

Cette idée de "dynamique des interactions entre corps physiques" a déjà commencé à être abordée en robotique [16], notamment dans le domaine de la robotique mobile où des résultats encourageants basés sur la notion de "simulation physique" ont permis de valider certains concepts. Nous reprenons ici cette idée, en y apportant certaines améliorations.

Cela consiste, dans un premier temps, à l'application et à l'adaptation de ce concept au domaine de la saisie, par la notion de "simulation physique". En effet, les incertitudes de modélisation et/ou de position entre la main et l'objet, de direction et/ou d'intensité des forces engendrées par les doigts et par l'objet, font que la stabilité de l'interaction main/objet est difficile à obtenir. L'idée de base consiste à modéliser explicitement aussi bien les interactions locales sur les objets (e.g. gravité, viscosité de l'air), que celles survenant au moment du contact entre les objets¹ (e.g. le frottement, les collisions, etc.), avec l'aide des lois de la mécanique du point matériel.

Dans un second temps, il faut l'associer aux concepts de planification. En effet, cette modélisation "physique" permet de déterminer le mouvement a priori de l'objet dans la main, soit au moment de la saisie dans un contexte de recherche de stabilité, soit pour amener l'objet dans une position compatible avec une tâche pré-définie, dans un contexte de manipulation. Le planificateur définit, lui, les contraintes liées à la tâche, à l'accessibilité et au positionnement des doigts pour initialiser et faire converger vers la "meilleure prise possible" le planificateur "physique".

¹La main est considérée comme un objet à part entière.

1.2 Synthèse de l’approche

Notre approche consiste à combiner les résultats d’un système discret de recherche de stratégies de saisie, basé sur la notion de pré-configuration, et d’une méthode de génération de mouvements, basée sur la modélisation physique de la main et de l’objet à saisir :

La première étape prépare l’exécution de la saisie en utilisant un “planificateur de pré-configuration”. Cela consiste à positionner la main et à configurer les doigts autour de l’objet, en prenant en compte les contraintes d’accessibilité et cinématiques. Les informations concernant le type de contact (palmaire, pulpaire et/ou du bout des doigts), et du type de saisie (sphérique, cylindrique, ...), sont incluses dans le planificateur. De plus, ces informations de “taxonomie” (type de contact et type de saisie) permettent d’engendrer des stratégies de fermeture des doigts, incluses elles aussi dans le planificateur de pré-configuration.

La seconde étape simule l’exécution de la saisie en utilisant “un planificateur physique”, tout en respectant les contraintes issues de la première étape. Ce planificateur physique utilise un générateur de mouvements “physiques” pour atteindre l’objet avec la main articulée, et s’assure de la stabilité de l’ensemble main/objet.

1.2.1 Le planificateur de pré-configuration

Le choix d’une prise, son accessibilité, sa compatibilité avec le contexte de manipulation (cf 2.1), même si ce n’est pas le sujet traité, n’est pas sans conséquences sur l’étude des interactions. En effet, le placement des doigts autour de l’objet, les relations implicites entre les doigts et leurs mouvements vers l’objet au moment de la fermeture sont les opérateurs d’initialisation quasiment obligatoires. Ils permettent d’obtenir les contacts finaux escomptés et la stabilité requise, c’est-à-dire une *bonne prise*.

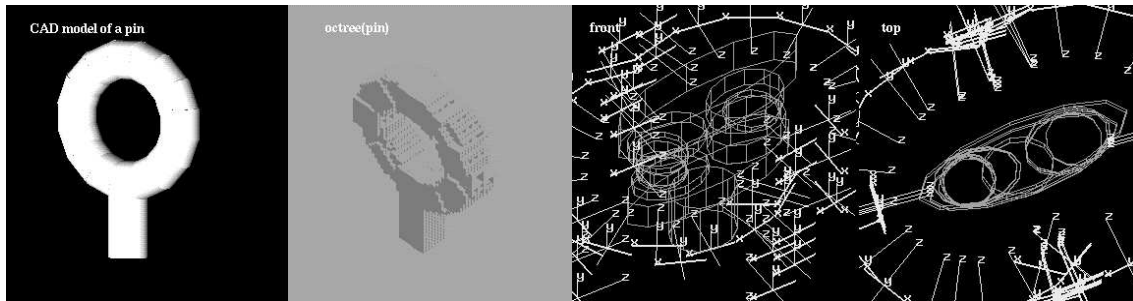


FIG. 1.2 - : Exemple de reconstruction d’un anneau par le planificateur de pré-configuration. Il utilise en entrée, aussi bien un modèle CAO classique (a), qu’un modèle volumique (octree) issue de capteurs extéroceptifs (b). Il reconstruit des informations pertinentes pour la saisie, comme les protubérances de l’objet, sous la forme de cylindres elliptiques, avec leurs accès possibles. La discrétisation utilisée dépend de la grosseur d’un doigt.

Nos développements antérieurs sur le sujet, ont abouti à la création d’un planificateur qui permet d’intégrer les trois mots clés (choix, accessibilité, contexte) de l’étude de la saisie [2][3][4], par l’utilisation du concept de pré-configuration. Ce concept est le résultat d’études neuro-psychologiques [10] sur la saisie humaine, qui montrent que pendant le mouvement balistique de la main vers l’objet à saisir, les doigts se configurent de manière à s’adapter à la forme et taille de la partie ou de l’objet à saisir. Ce planificateur est basé sur la recherche de zones géométriquement homogènes, et de leur propriétés morphologiques, utilisables pour la saisie. La représentation 3D de ces zones homogènes est approchée par un ensemble de “cylindres elliptiques” (figure 1.2). Cette représentation par cylindres elliptiques donne toutes les informations nécessaires pour calculer une pré-configuration : des informations sur la forme et taille de l’objet par analyse de ses axes ; des informations d’accessibilité locale avec les directions de ses axes.

Ce planificateur intègre tous les “ingrédients” nécessaires à l’initialisation de la fermeture effective des doigts sur l’objet, c’est-à-dire une pré-configuration de la main :

- Une information sur la taille et forme de l’objet ou partie d’objet à saisir, notamment si la partie de l’objet (ou l’objet) à saisir est plutôt sphérique, cylindrique, ... Ces informations regroupent trois valeurs qui sont : l’épaisseur, la longueur et la largeur de la partie à saisir par rapport à l’accès choisi.
 - Une position/orientation de la main près de l’objet à saisir, tenant compte de l’environnement.
 - Une configuration des doigts autour de l’objet (proche de la position finale de saisie). La figure 1.3 montre l’exécution d’une pré-configuration sur un cylindre (la main est fixe sur son support). Cette configuration sous-entend un certain nombre d’attributs utiles pour l’étude de l’interaction :
 - Le *nombre de doigts* impliqués dans cette stratégie de saisie (2 ou 3 doigts pour une main articulée classique : pouce, majeur, index).
 - Le *type de contact* que l’on espère comme résultat de la saisie : plutôt au bout des doigts, pulpaire ou palmaire si des contacts avec la paume sont envisagées. Ce type d’information influe sur le mouvement des doigts au moment de la fermeture, ainsi que sur les directions des efforts qui vont être appliqués.
 - La *relation (et la position)* entre les différents doigts qui définit la taxonomie de saisie. S’il s’agit d’une saisie cylindrique, le “pouce” est en opposition au couple “{index, majeur}”. S’il s’agit d’une saisie sphérique, les trois doigts s’opposent naturellement.
- Cette information “d’opposition” est intéressante à plus d’un titre. Elle influence la position finale des doigts, les uns en fonction des autres. En effet, supposons que l’équilibre ne soit pas assuré au moment de la fermeture, et que l’on veuille conserver cette relation d’opposition en bougeant la position

des doigts, sans changer l'orientation des efforts appliqués vers l'objet. Les conditions d'équilibre font que :

- Si c'est une relation cylindrique, les doigts auront tendance à se rapprocher pour “contrer” le pouce.
- Si c'est une relation sphérique, les doigts auront tendance à bouger vers des positions équidistantes.

La recherche de positions d'équilibre, ou de positions permettant la manipulation, ne peut se passer des conditions d'initialisation, sous peine de s'écarter de la réalité dans l'étude de la saisie. Nous expliquons dans le chapitre 4 comment prendre en compte ces conditions initiales venant de la pré-configuration, et comment nous les transformons pour être compatible avec le modèle utilisé par le planificateur physique.

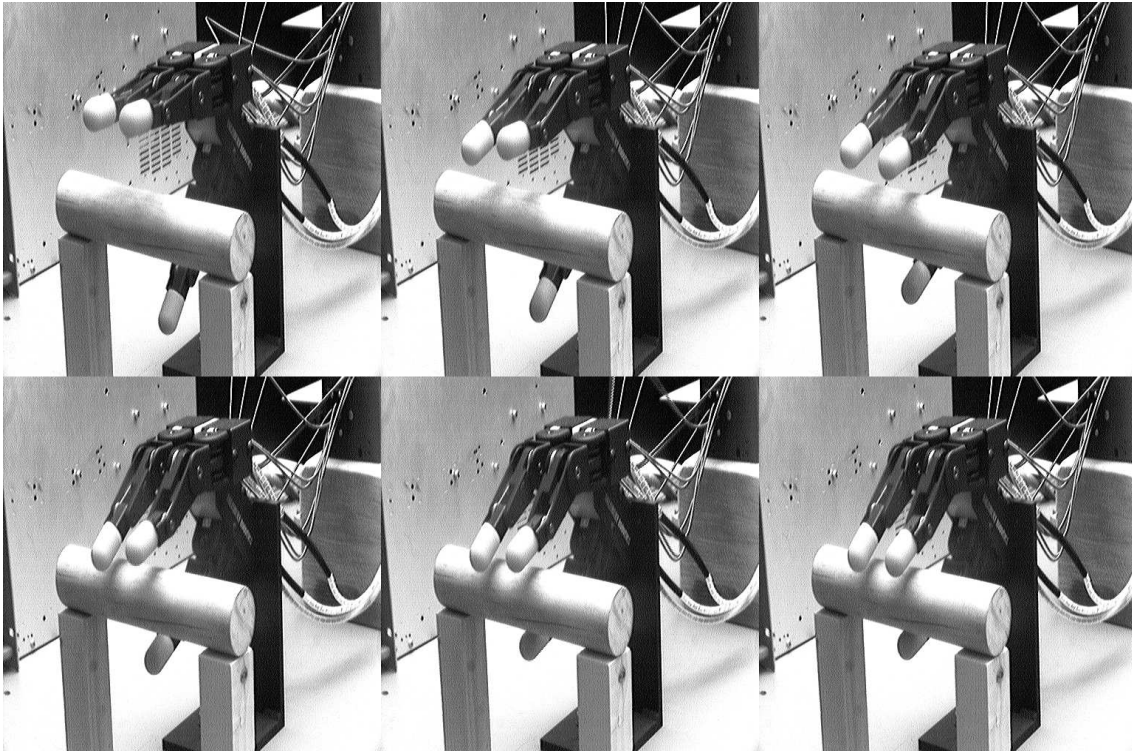


FIG. 1.3 - : Exécution d'une pré-configuration pulpaire pour un cylindre posé sur deux supports, avec la main de Salisbury (à poste fixe).

1.2.2 Le planificateur physique

Le planificateur de pré-configuration est utilisé pour amener la main à une configuration initiale autour de l'objet. Ensuite, la main, l'objet, les interactions entre les deux, les propriétés de stabilité et les informations venant du planificateur de pré-configuration, sont utilisés et traduits en un modèle compréhensible pour le planificateur physique. Le planificateur et son modèle sont abondamment détaillés dans la suite de ce rapport. Utilisant ce modèle à chaque pas de temps, le planificateur physique

calcule les interactions entre les objets (ici la main et l'objet à saisir), en terme des forces appliquées sur chaque objet, pour déterminer leurs nouvelles positions. Il itère jusqu'à la stabilisation de l'ensemble main/objet. On nomme par la suite O l'Objet et M la Main.

Ce rapport de recherche est organisé de la manière suivante. La première partie du chapitre 2 fait état de la problématique de la saisie du point de vue des interactions main/objet. La seconde partie 2.2 passe en revue l'état de l'art sur les modèles physiques. Le chapitre 3 propose un modèle physique pour tous les objets et le moyen de calculer les interactions entre les objets par différences finies sur les équations du mouvement. Le chapitre 3.3 valide le modèle proposé dans le chapitre précédent avec différents types de forces externes agissant sur des tiges, et propose une représentation à partir de tiges articulées pour une main robotique. Il discute aussi, de la notion d'identification (§ 3.4) qui relie le comportement naturel d'un objet au comportement simulé par modèle physique. Le chapitre 4 montre comment exprimer les contraintes issues du planificateur de pré-configuration dans le modèle du planificateur physique. De plus, il apporte de nouvelles solutions au problème de la saisie, comme la manipulation de l'objet dans la main, par l'utilisation des modèles physiques.

Chapitre 2

Analyse du problème

Ce chapitre explique le problème de la préhension par une main articulée. Il présente les approches principales utilisées pour l'étude de l'interaction entre la main et l'objet au moment du contact. Il propose ensuite de résoudre ce problème en utilisant la notion de “modèle physique”.

2.1 Problématique de la saisie par une main robotique

2.1.1 Le problème de base

Considérons la tâche simple qui consiste à “prendre et poser” un objet avec une main articulée. Le problème décisionnel pour réaliser cette tâche de manière automatique se pose suivant de multiples termes [23] :

1. Quelle prise choisir (i.e. comment saisir l'objet)?
2. La prise choisie est-elle accessible?
3. La prise choisie est-elle compatible avec le contexte de manipulation (i.e. permet-elle de réaliser la tâche spécifiée)?
4. La prise choisie est-elle en équilibre stable (i.e. l'objet ne risque-t-il pas de bouger dans la main)?

Dans nos travaux précédents (§ 1.2.1), nous avons proposé de résoudre les trois premières questions par l'utilisation de la notion de pré-configuration. Les modèles utilisés pour l'analyse de pré-configuration, bien qu'indispensables, ne suffisent plus pour résoudre le problème qui nous intéresse maintenant et qui concerne la quatrième question, c'est-à-dire les interactions main/objet : contrôler le mouvement de l'objet au moment de la saisie.

Habituellement, et pour tout être humain, pour garantir le succès du mouvement de fermeture des doigts, une rétroaction visuelle est nécessaire pour détecter la nouvelle position de l'objet afin de corriger le chemin planifié. D'un point de vue informatique,

cette rétroaction visuelle, à l’heure actuelle, est loin d’être réalisée en “temps réel”. Toutes les approches ayant pour but de résoudre ce problème, évitent ce type de rétroaction. Certaines essaient d’empêcher le mouvement de l’objet en effectuant une analyse de “stabilité quasi-statique” 2.1.2. D’autres s’assurent que les forces interagissant entre la main et l’objet tendent à corriger la position de l’objet vers une position stable dans la main (analyse de conditions de “stabilité par compliance” § 2.1.2.2). Enfin, les approches comme la notre, qui essaient de prédire ce mouvement à partir d’une rétroaction tactile (§ 3).

2.1.2 Interactions main/objet

L’interaction entre la main et l’objet est étudiée la plupart du temps sous les deux aspects suivants :

- On essaye de trouver des positions autour d’un objet de telle manière que le résultat des directions et efforts tendent vers **la stabilité**. Les doigts s’adaptent à la morphologie de l’objet tandis que celui-ci est considéré comme statique. Le type de contact considéré est le point. On parle alors d’analyse de “stabilité statique” [21][25].
- On peut aussi considérer que le résultat de la stabilité consiste à amener l’objet “à l’intérieur des doigts”. Cette fois-ci, l’objet lui aussi bouge de manière à s’adapter à la morphologie de l’outil de préhension, de manière “compliante”. On parle alors d’analyse de conditions de “stabilité par compliance” [18] [6].

Le but est toujours d’obtenir un équilibre final de l’objet dans la main. On présente ici les principes permettant d’obtenir la stabilité et les conditions sous lesquelles on est capable de les utiliser.

2.1.2.1 Analyse de “stabilité statique”

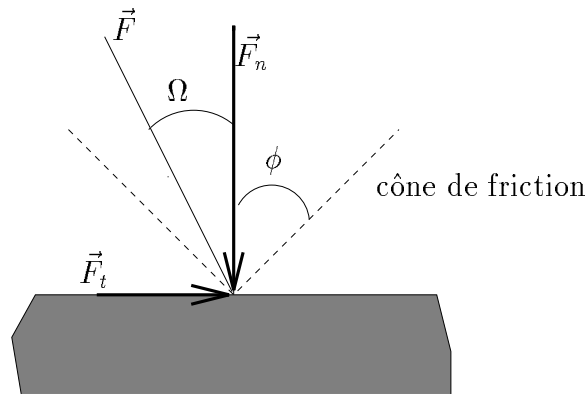


FIG. 2.1 - : Condition de non glissement. La force appliquée $\vec{F}$ doit être dans le cône de friction.

Cette approche consiste à calculer les valeurs des forces à appliquer par la main sur l'objet, de sorte qu'il ne bouge pas au moment de cette interaction. Quatre conditions sont nécessaires mais non suffisantes, pour garantir la stabilité de la saisie [6, 24] :

Condition 1 (équilibre statique) : L'objet doit être en équilibre, c'est à dire que le résultat des forces et des moments qui agissent sur cet objet est nul. L'équilibre est caractérisé par les deux formules :

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0}, \quad \sum_i \vec{F}_i \wedge \vec{r}_i = 0$$

Où $\vec{F}_i$ est la force de contact entre l'objet et le doigt numéro i , et $\vec{r}_i = [r_{xi}, r_{yi}, r_{zi}]^T$ exprime la position du doigt dans un repère quelconque.

On peut exprimer ces équations sous forme matricielle :

$$W = G\vec{F} \text{ avec } G = \begin{pmatrix} I & \cdots & I \\ R_1 & \cdots & R_n \end{pmatrix} \text{ et } R_i = \begin{pmatrix} 0 & -r_{zi} & r_{yi} \\ r_{zi} & 0 & -r_{xi} \\ -r_{yi} & r_{xi} & 0 \end{pmatrix}$$

où W est le résultat des forces et moments de l'action des doigts sur l'objet, exprimé sous forme matricielle, G est la matrice $6 \times n$ des moments aux n points de contact, I la matrice identité, R_i une matrice anti-symétrique exprimant $\wedge \vec{r}_i$), et enfin, $\vec{F} = [f_1, \dots, f_n]^T$ est le vecteur des directions des forces exercées aux points de contact. On appelle communément W la matrice de saisie [19].

Condition 2 (pas de glissement) : Toutes les forces appliquées par les doigts sur l'objet doivent rester dans le cône de friction, pour empêcher le glissement. La formule suivante traduit cette condition :

$$\mu |\vec{F}_n| > |\vec{F}_t| \text{ ou } |\Omega| < (\arctan(\mu) = \phi)$$

où μ est le coefficient de frottement (ϕ l'angle associé), $\vec{F}_n$ et $\vec{F}_t$ sont les composantes perpendiculaire et tangente de la force. Ω est l'angle entre la direction de la force et la perpendiculaire au point de contact. La figure 2.1 illustre cette condition.

Condition 3 (force-closure) : On doit être capable d'augmenter les efforts exercés par les doigts jusqu'à un certain seuil (seuil mécaniquement possible), afin de pouvoir contrer des forces externes possibles (force de gravité par exemple). On appelle cette condition, la condition de "force-closure" [21]. Elle s'exprime mathématiquement par la résolution du système linéaire à n inégalités, qui n'a pas de solutions homogènes ou particulières :

$$W^T \delta_t \geq 0 \text{ n'a pas de solutions}$$

où δ_t représente un mouvement infinitésimale de l'objet à saisir (translation et rotation). Intuitivement, si les efforts exercés par les doigts peuvent compenser

n'importe quelle force externe, le seul mouvement infinitésimale possible de l'objet est le mouvement nul.

Une fois les critères géométriques satisfaits (c'est-à-dire les points de contact et directions des forces répondant aux équations précédentes, trouvés), il est très facile, connaissant les valeurs des forces appliquées sur chaque doigt, de vérifier l'équilibre en résolvant l'égalité suivante : $W\vec{F}_a = \vec{0}$, où $\vec{F}_a$ représente le vecteur des amplitudes associées aux différentes forces.

Le poids de l'objet peut être assimilé, soit à une force "interne" (i.e une force comprise dans la matrice W) et il est considéré comme une des n forces de contact, soit à une force "externe" (i.e une force non répertoriée dans W) et il est exprimé par le torseur $\vec{Q} = [0, 0, -mg, 0, 0, 0]^T$ dont il faut pouvoir annuler l'effet (la pesanteur), c'est-à-dire résoudre l'égalité $\vec{Q} = W\vec{F}_a$.

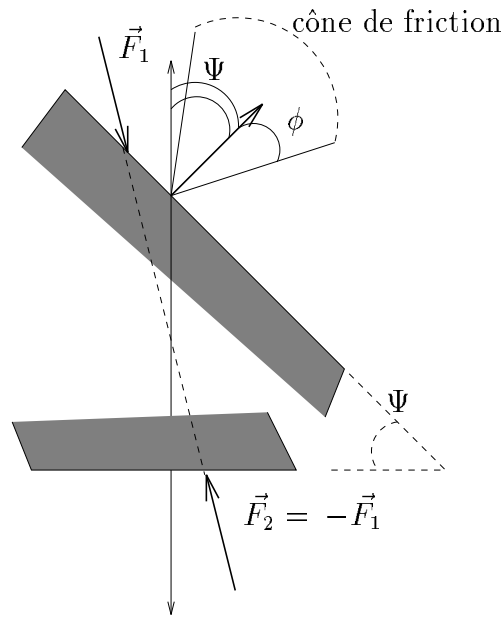


FIG. 2.2 - : Condition de saisie pour deux contacts ponctuels.

Condition 4 (contraintes géométriques de contact) : Certaines des conditions précédentes peuvent être exprimées géométriquement. En effet, encore faut-il s'assurer que l'objet puisse être saisi par la main, i.e que certaines conditions sur la géométrie des points de contact soient remplies.

La figure (fig.2.2) illustre cette contrainte pour deux points de contact : l'angle entre les deux faces de contact Ψ et l'angle du cône de friction ϕ (si il s'agit d'un contact ponctuel), doivent vérifier l'inégalité $\Psi < 2\phi$.

Dans cet ordre d'idées, Ponce et Faverjon [25] ont proposé une condition suffisante permettant de savoir si trois points de contacts dans le plan de saisie sont "force-closure" : "si les trois normales intérieures aux points de contacts couvrent

positivement le plan avec des angles deux à deux inférieurs à $\pi - 2\phi$ (2ϕ est l'angle du cône de friction), et l'intersection des trois cônes doubles (ouvert) de friction n'est pas vide" (voir [25] pour la démonstration).

2.1.2.2 Analyse des conditions de “stabilité par compliance”

La “compliance” est l'utilisation implicite de la capacité que, la main, le poignet, ou l'objet, ont de s'adapter et de corriger une trajectoire planifiée, en utilisant les forces de contact ou leur possibilité de déformation.

Cette approche essaie de bénéficier de la géométrie de l'objet à saisir, et de la géométrie de la main robotique, pour créer un mouvement correctif agissant sur l'objet. Dans ce cas, on n'a pas besoin, ni de détecter ce mouvement, ni de le prédire. La figure 2.3 montre un exemple tiré de [18], à partir duquel on peut constater que cette méthode ne peut être appliquée qu'à certains cas particuliers d'outils et d'objets : notamment, la forme de l'objet à saisir doit être connue à l'avance et doit s'adapter à la forme de l'outil de préhension. Il existe donc une relation étroite qui lie l'objet à l'outil. Néanmoins, l'originalité de cette méthode consiste à réduire les incertitudes de localisation de l'objet, sans utilisation de capteurs, mais par une suite de mouvements adéquats. Ceux-ci sont engendrés par une étude des phénomènes de frottement de l'objet sur le plan sur lequel il repose.

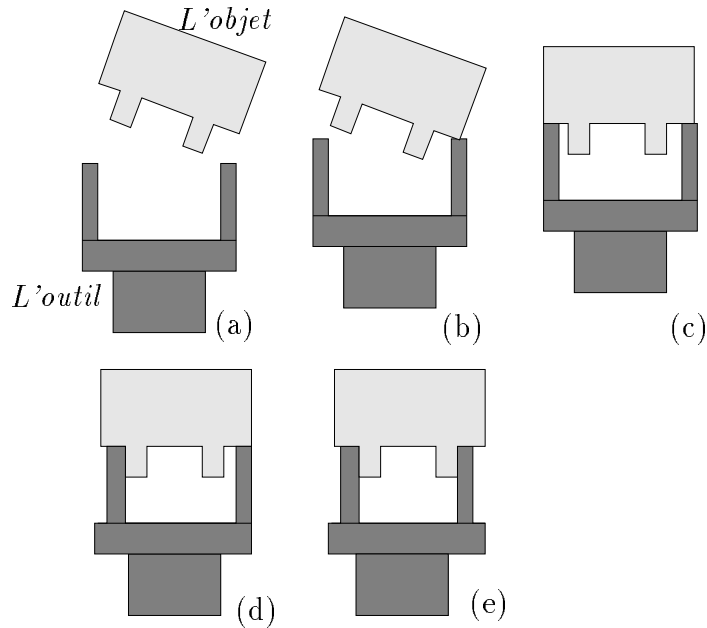


FIG. 2.3 - : Étapes de saisie avec “compliance” [Mason 82]. (a)-(b) l'outil arrive vers l'objet jusqu'au contact, (c) l'objet bouge (compliance de l'objet par rapport à l'outil), (d)-(e) l'outil referme ses mors un par un (compliance de l'outil par rapport à l'objet).

Applicant le principe précédent, Fearing [6] contrôle le mouvement de l'objet par le contrôle du comportement des doigts. Le mouvement de l'objet est contraint par

l'application de forces sur les doigts, qui vont générer son mouvement suivant un chemin désiré. Il donne l'exemple de la rotation d'un parallélépipède dans les doigts. Il utilise la rotation naturelle de l'objet, générée par le moment résultant de l'enlèvement d'un doigt (rotation dans le plan). La généralisation pour tout type d'objet est cependant très difficile. Il est en effet difficile de prévoir le mouvement d'un objet subissant une force extérieure, sans la connaissance parfaite des paramètres "physiques" de l'objet (masse, inertie, ...).

Cependant, l'idée de réduire les incertitudes de localisation de l'objet, par le contrôle du mouvement du préhenseur, est intéressante. C'est la même idée qui est utilisée avec des moyens différents dans le procédé d'analyse morphologique du planificateur de pré-configuration. Notamment, il prépare l'interaction en définissant le type de contact, le type de prise et la stratégie de fermeture à utiliser pour engendrer la saisie.

2.1.3 Problèmes ouverts

Le calcul des conditions d'équilibre n'est pas facile dans le cas général, où il faut considérer plusieurs doigts qui agissent sur un objet de forme quelconque. Les approches actuelles qui étudient les interactions main/objet ne sont donc pas satisfaisantes à bien des égards, et notamment dans le cas général de la saisie d'objets de forme quelconque. Les principales hypothèses restrictives concernent les contacts (le plus souvent ponctuels), les classes d'objets à saisir (le plus souvent des objets manufacturés simples), les modèles de représentation (le plus souvent géométriques) et l'environnement d'utilisation (quasiment jamais pris en compte). Le plus souvent, on étudie la stabilité sous les hypothèses suivantes :

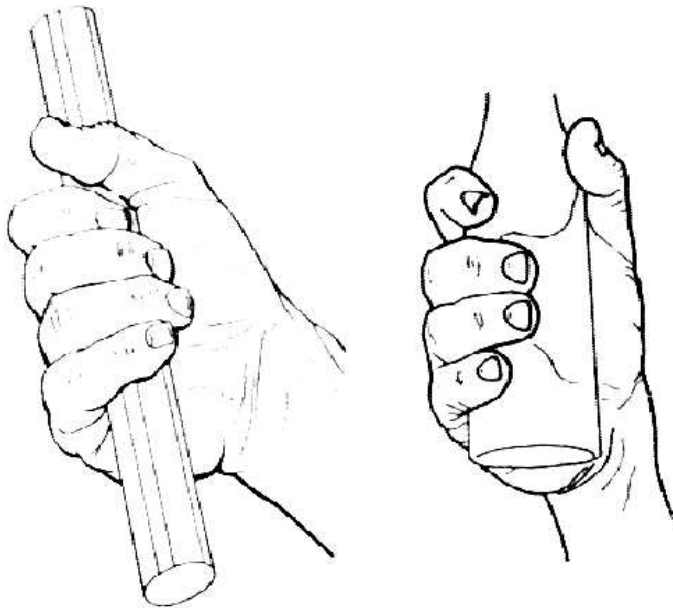


FIG. 2.4 - : Exemples de contacts non ponctuels à considérer.

1. *Le contact considéré est ponctuel.* Les doigts peuvent engendrer des forces tangentées et normales, sans générer de moments aux points de contact.

2. *Les calculs se ramènent à un calcul 2d dans le plan de saisie*, formé par les points de contact (trois points ou plus dans le même plan). Le plan de saisie est représenté par une coupe polygonale fermée ou de forme arrondie dont on connaît la courbure [9].
3. Enfin, *seul des critères géométriques et cinématique* sont pris en compte pour l'étude de stabilité.

Ces hypothèses ne suffisent plus, dès que l'on veut réellement appliquer à une vraie main le résultat de l'étude de stabilité. En effet, les contacts deviennent mous et surfaciques ("soft fingers") et les objets (dont la main) ont des caractéristiques physiques, comme la masse ou l'inertie, qui ne peuvent pas être négligées. Certaines de ces hypothèses, dans un souci de réalisme, ne peuvent pas être écartées :

- Ni la main, ni l'objet ne sont des entités purement rigides. Notamment, les doigts se déforment aux points de contact pour faire apparaître une surface de contact. Or cette déformation modifie profondément la physique des interactions main/objet et écarte l'hypothèse de contact ponctuel sur laquelle reposent les approches antérieures. En particulier, sous l'hypothèse de contacts multiples, on augmente le nombre de cas où l'objet est dans des conditions de saisie satisfaisantes. Notamment, les contacts pulpaire et palmaire peuvent alors être considérés (fig. 2.4). Cependant, ces phénomènes ne peuvent pas être étudiés à l'aide des modèles géométriques classiques.
- Les conditions de stabilité, telles qu'elles ont été décrites, opèrent en boucle ouverte (i.e sans rétroaction). Or ceci n'est pas réaliste, car les calculs faits et les modèles sont approximatifs. Ce type d'approche, contrairement aux approches automatique pour la commande, ne permettent pas de "contrôler" le mouvement éventuel de l'objet à saisir en cas d'instabilité "instantanée" (ce qui est le cas le plus courant). Il faut donc étudier les stratégies qui permettent de relier les forces engendrées par le système objet/main et le contrôle des doigts. Là encore, les modèles géométriques purs ne sont pas adaptés.

C'est le but de notre planificateur physique de prendre en compte ces aspects physiques de la saisie, en opérant en deux phases :

- Analyse de préconfiguration pour déterminer les conditions initiales de saisie, et le type de stratégie à appliquer : type de contact, type de saisie, accessibilité et stratégie de fermeture.
- Etude de stabilité et des stratégies de commande : connaissance des forces, moments, positions et vitesses engendrant la convergence du système main/objet vers la stabilisation.

2.2 Les modèles physiques

2.2.1 Principe des modèles physiques

Dans notre cas, nous nous intéressons aux réactions (mouvements, déformations) des objets par rapport aux forces en présence.

Par modèle physique, on décrit non pas le mouvement mais son support : l'objet physique. Un mouvement spécifique s'obtient par application d'un ensemble d'actions sur cet objet. Il est dit "physique" car ses déplacements et ses déformations sont reliés aux actions commandées par les lois de la physique, en l'occurrence la physique du point.

Les apports de ce type de modèle sont probants dans la simulation du mouvement et des interactions entre objets : au lieu d'énumérer tous les cas possibles de comportements (et de mouvements), ou d'utiliser les lois de la mécanique du solide (pas toujours calculable), on simule physiquement le mouvement d'un objet comme étant le résultat de sa réaction aux événements extérieurs (animation comportementale). Les avantages que nous voyons dans le principe de "simulation physique" sont les suivants :

1. Le principe de "simulation physique" repose sur la notion de causalité : en l'occurrence, le mouvement est la conséquence directe des actions exercées sur l'objet considéré (actions qui se traduisent ici en termes de force). Une propriété importante de ce principe, réside dans le concept sous-jacent "d'action/réaction". Ceci signifie que l'on est potentiellement capable de diriger le résultat de cette simulation (i.e le mouvement produit) en introduisant le concept de "*mouvement réflexe*". En pratique, cela permet d'amener l'objet dans une position voulue, ou de re-positionner en cours de mouvement l'objet qui se dirige vers une position non conforme : par exemple, maintenir la stabilité de l'objet dans la main dans le cas de la saisie.
2. Le principe de "simulation-physique" permet de prendre directement en compte l'interaction physique, soit entre les objets eux-même, soit entre les objets et le milieu dans lequel ils se déplacent : l'air, l'eau, et le vide.
3. Le principe de "simulation-physique" permet de se rapprocher du principe de "contrôle" utilisé en robotique : contrôler le mouvement d'un objet se traduit par la maîtrise des efforts extérieurs à appliquer à cet objet au cours du mouvement.
4. Un objet physique est par définition déformable, ce qui permet de prendre en compte "la raideur" des objets et de pouvoir ainsi manipuler des objets "mous".

2.2.2 La modélisation physique : le modèle des ressorts

La modélisation du mouvement et de la déformation des objets est un domaine courant en synthèse d'image [26, 7, 5]. Malgré le fait que ces modèles soient inspirés de la mécanique, les limitations suivantes font qu'ils ne sont pas encore vraiment utilisés

en robotique, et par conséquent, on ne va aborder que les modèles basés sur des notions mécaniques simples et contrôlables :

- Ces modèles sont utilisés pour faire de l’animation sur ordinateur, et dans ce cas, la proximité entre l’objet de référence et l’objet simulé repose sur des expérimentations sensori-motrices [12] que peut avoir l’homme dans des situations de manipulation et de perception naturelle d’un objet réel et d’un objet animé. La perception de l’homme est capable de détecter qu’un certain mouvement de l’objet n’est pas naturel dans son comportement (aspect qualitatif) mais, elle n’est pas capable de décider si sa trajectoire produite est réellement correcte (aspect quantitatif).
- Quelques modèles sont faits pour simuler un aspect physique donné (mouvement ou déformation surfacique [7], ...).
- Certains modèles font intervenir des concepts mathématiquement compliqués. Le réglage des différents paramètres, qui définissent les relations afin de simuler le comportement réel, en est affecté.

Dans le domaine de la mécanique, on ne trouve pas la notion d’un modèle mécanique général. Les mécaniciens traitent correctement les problèmes au cas par cas. Par exemple, la théorie des éléments finis [8] traite des déformations d’un objet donné, mais pas de son mouvement, de plus elle ne prend en compte, ni l’interaction des objets entre eux, ni l’interaction entre les objets et le milieu dans lequel ils évoluent.

En bref, un modèle capable de traiter le mouvement, les déformations et les interactions doit être “réel”, c’est-à-dire qu’il doit imiter autant que possible, la réalité physique des matériaux (§ 3.4).

La mécanique nous apporte plusieurs modèles théoriques pour expliquer le comportement des matériaux, nous en présentons un ici : le modèle des ressorts qui a servi de base à notre propre modèle.

2.2.2.1 Le modèle des ressorts

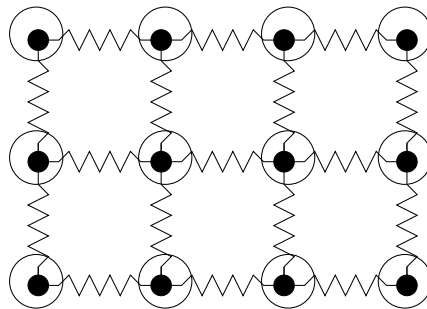


FIG. 2.5 - : Modèle d’un matériau à base de ressorts.

Dans ce modèle, les liaisons entre les atomes ou les molécules d’un matériau solide sont assimilées à des ressorts (fig 2.5). Il existe une proportionnalité entre la force $\vec{F}$

appliquée à un ressort et la déformation absolue résultante $\Delta d = (d - d_0)$, où d_0 est la longueur initiale du ressort au repos et d sa position courante, à un instant donné. Ce comportement macroscopique se traduit par la relation suivante :

$$\vec{F} = -\lambda \Delta d$$

où λ est la constante de raideur du ressort. Lorsque le matériau est soumis à une déformation élastique, il emmagasine une certaine énergie de déformation, de même qu'un ressort déplacé de sa position d'équilibre par une force, emmagasine une énergie W tel que :

$$W = \frac{1}{2} \lambda \Delta d^2$$

Ce modèle garantit que les objets retournent toujours à leur forme géométrique initiale, après avoir été déformés par des forces extérieures. En effet, l'équation ci-dessus présente un minimum au point $d = d_0$, qui est la position du ressort au repos (fig. 2.6).

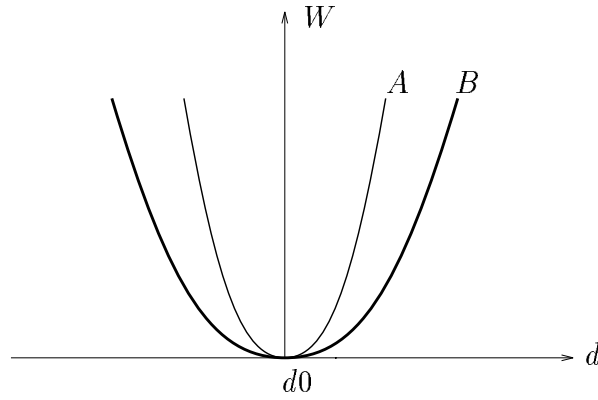


FIG. 2.6 - : Variation de l'énergie W de deux ressorts A et B en fonction de leur allongement Δd ($\lambda_A > \lambda_B$).

Ce modèle est utilisé dans le système Cordis-Anima [11, 12, 17], basé sur la modélisation physique, pour produire des images en mouvement. Il adopte comme principe de modélisation de l'espace physique, les trois axiomes suivants :

1. La matière est modélisée en masses ponctuelles, dont les comportements sont donnés par la loi générale de la dynamique $\vec{F} = m\vec{\gamma}$, mise sous la forme de "différences finies" (§ 3.2.5). Chaque masse se présente comme un dipôle orienté $\vec{F} \Rightarrow \vec{P}$, c'est-à-dire que l'effet des forces $\vec{F}$ appliquées change la position $\vec{P}$ de la masse : $P = f(\vec{F})$ (la position est fonction de la force).
2. Les caractéristiques physiques de la matière (élasticité, viscosité) ont un comportement régi respectivement par les deux équations suivantes :

$$\vec{F} = k\vec{P} \text{ et } \vec{F} = -z\vec{V}$$

où $\vec{F}$ est la somme des forces extérieures, k (resp. z) une constante d'élasticité (resp. de viscosité), $\vec{P}$ la position de la matière, et $\vec{V}$ la vitesse. On remarque que ces deux équations décrivent le comportement d'un ressort physique : ressort idéal + amortisseur. Ces composants sont représentés par un dipôle orienté $\vec{P} \Rightarrow \vec{F}$, c'est-à-dire que l'effet d'une modification de la position $\vec{P}$ est de créer une force $\vec{F}$.

3. Un objet est un ensemble de masses ponctuelles liées entre elles par des composants de type ressort. On représente alors un objet par un dipôle non orienté $\vec{P} \Leftrightarrow \vec{F}$ ou quadripôle $\vec{P} \Rightarrow \vec{F}$ et $\vec{F} \Rightarrow \vec{P}$ (fig 2.7).

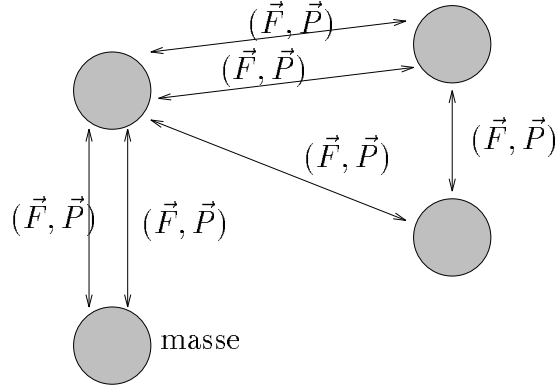


FIG. 2.7 - : Discrétisation structurelle d'un objet physique [Cordis-Anima].

Le modèle de Cordis-Anima a été utilisé pour faire interagir un véhicule et un terrain naturel [16, 15]. Le modèle physique du véhicule est construit à partir de son modèle

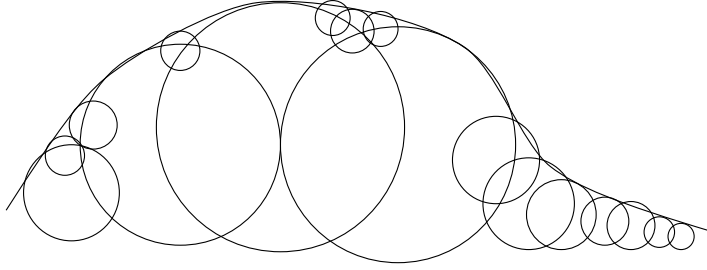


FIG. 2.8 - : Une représentation d'un terrain par modèle physique.

géométrique, en choisissant un ensemble de points représentatifs auxquels on associe des masses (à chaque point correspond une masse). Ces différentes masses sont connectées entre elles, afin de définir les composants rigides et articulés du véhicule. Le modèle physique du terrain est construit à partir de son modèle géométrique, en cherchant une agglomération de boules adaptée à la surface du terrain. A chaque boule est associée une masse m , et un rayon r qui représente une zone non franchissable autour de cette masse (figure 2.8). L'interaction entre le terrain et le véhicule est représentée par une force répulsive, qui agit sur les masses ponctuelles qui sont en contact.

Chapitre 3

Modélisation des interactions main/objet par utilisation de modèles physiques

Ce chapitre présente une étude de l'interaction main/objet dans l'opération de saisie par une main articulée. Dans la première partie, on replace cette étape de planification, dédiée à l'étude des interactions main/objet, dans le processus général de planification d'une opération de saisie par une main articulée. La seconde partie décrit le principe de la modélisation des objets, et celui du calcul du mouvement à partir de cette représentation. Enfin, la troisième partie montre comment les interactions entre objets peuvent être modélisées à l'aide des modèles physiques.

3.1 Principales étapes du processus

L'approche utilisée pour prendre en compte l'interaction main/objet, consiste à développer un algorithme basé sur la notion de modèle physique. Cet algorithme permet de prendre en compte même les interactions non prévues par le planificateur géométrique.

Par définition d'un modèle physique, le mouvement est considéré comme la réaction de l'objet aux forces extérieures. Ces valeurs sont utilisées pour prédire le mouvement de l'objet dès son interaction avec la main.

On peut résumer les différentes étapes de l'opération de saisie avec ce type de modèle de la façon suivante :

Etape (1). Construire une représentation physique de la main du robot et de l'objet à saisir, en tenant compte de leur géométrie, et de leurs caractéristiques physiques, telle la rigidité, le poids, etc. . .

Etape (2). Utiliser le planificateur géométrique pour mettre la main en position initiale de saisie. Cette planification est celle décrite au paragraphe 1.2.1. Elle permet

de placer la main en “pré-configuration” autour de l’objet, avec toutes les informations qui lui sont associées. Le lien entre les deux planificateurs est proposé plus loin (§ 4.4).

Etape (3). Détecter les forces d’interactions entre l’objet et la main aux points de contact, à chaque pas. Ces forces d’interactions sont celles engendrées par la friction, la collision, la viscosité, etc. . .

Etape (4). Calculer la nouvelle position et la nouvelle forme de l’objet (déformation), en fonction des forces d’interactions, en appliquant la loi générale de la dynamique $\vec{F} = m\gamma$. En effet, les objets sont décomposés en particules reliées entre elles, dont on spécifie explicitement la rigidité (§ 3.2.2).

Etape (5). Calculer les valeurs des forces à appliquer pour corriger en conséquence la position de la main.

Etape (6). Répétition des étapes (3) à (5) jusqu’à stabilisation de l’ensemble main/objet.

Les étapes (1) et (3) à (6) concernent le “**planificateur physique**”. Elles intègrent une composante de modélisation et une composante de mouvement des objets modélisés.

3.2 Modélisation Physique

3.2.1 Principe de base

Le modèle proposé s’inspire largement du modèle des ressorts décrit au chapitre précédent (§ 2.2). Les différences seront expliquées plus tard. Pour approcher le mouvement réel de l’objet ou du moins pour pouvoir mesurer la distance entre la trajectoire suivie par l’objet modèle et sa trajectoire réelle, il faut que les lois utilisées respectent les lois de la mécanique. Ce respect des lois impose un certain nombre de règles à appliquer :

Règle 1 : Le mouvement d’une masse ponctuelle faisant partie de l’objet doit respecter la loi générale de la dynamique :

$$\vec{F} = m \vec{\gamma} \quad (3.1)$$

Où $\vec{F}$ est la somme des forces qui agissent sur cette masse, m sa masse, et γ son accélération.

Règle 2 : Le mouvement du centre d’inertie de l’objet doit aussi respecter la loi générale de la dynamique (eq. 3.1), avec pour $\vec{F}$ la somme des forces extérieures agissant sur l’ensemble des masses ponctuelles formant l’objet.

Règle 3 : Quand deux masses ponctuelles, appartenant à deux objets différents, sont en interaction, la force qui est exercée sur l’une est égale et opposée à celle qui est exercée sur l’autre. Principe de l’action/réaction.

Règle 4 : Le centre d’inertie de l’objet simulé doit coïncider avec celui de l’objet référence.

Règle 5 : La somme des forces “intérieures” de l’objet doit toujours être nulle. On appelle force intérieure toute force dont la source appartient au système étudié. Les notions de force intérieure et extérieure sont liées au système que l’on étudie. Par exemple, soient deux boules entrant en interaction. La force de collision entre elles, est une force intérieure pour le système “deux boules”. Elle est une force extérieure pour les deux systèmes “une boule”.

Règle 6 : La trajectoire du centre d’inertie d’un objet ne peut pas être affectée par les forces intérieures.

Règle 7 : La masse totale de l’objet simulé doit être égale à celle de l’objet référence, sinon leurs réactions seront différentes face à une même force extérieure.

Règle 8 : Un mouvement de vibration d’un objet libre doit s’amortir dans un temps fini, du fait des forces de collision entre les différentes particules.

Règle 9 : La position d’équilibre de l’objet simulé, soumis aux mêmes forces extérieures, doit être unique (pas de minima locaux de la fonction de l’énergie).

Remarque : R_i référence la règle i , $i \in [1, \dots, 9]$. $\square$

3.2.2 Représentation du modèle $R\phi$

Nous décrivons dans ce paragraphe les structures de notre modèle physique. Ce modèle est nommé $R\phi$.

3.2.2.1 Discrétisation structurelle

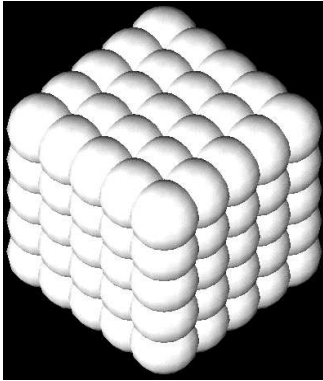


FIG. 3.1 - : Discrétisation d’un cube en sphères.

Une représentation physique d'un objet est une agglomération de masses ponctuelles appelées "particules", reliées entre elles, et vérifiant les propriétés suivantes (fig. 3.1) :

- *La masse* : la somme totale de ces masses ponctuelles est égale à la masse totale de l'objet modélisé (respect de R_8).
- *Le centre d'inertie* : est situé au même endroit que celui de l'objet référence.
- *La représentation* : chaque masse est entourée d'une zone non franchissable par les autres objets (représentation sphérique). La répartition des masses sur l'objet est uniforme par rapport à son modèle géométrique.
- *La forme* : le volume constitué par l'union des masses ponctuelles représentées par des sphères, est égal et coïncide avec celui de l'objet de référence dans les mêmes conditions (respect de la forme géométrique).
- *Le comportement* : les masses ponctuelles voisines sont liées par des relations qui essaient de ramener l'objet à sa position d'équilibre, c'est-à-dire la position dans laquelle l'énergie potentielle est minimale. Ces relations sont des fonctions qui génèrent des forces à partir des positions : si la position relative de deux masses voisines change, une force va repousser les deux masses vers leurs positions initiales (comportement d'un ressort).

3.2.2.2 Relations entre particules

Il y a deux types de relations entre particules : les relations prismatiques (dites de distance) et les relations angulaires.

Les relations de distance (notées LS). Il s'agit de relations entre deux masses adjacentes, qui essaient de garder une distance constante entre elles. Ce type de relation se rapproche du comportement d'un ressort associé à un amortisseur lié en parallèle. Le ressort empêche un mouvement relatif des deux masses, et l'amortisseur empêche le ressort d'osciller autour de sa position d'équilibre. La forme algébrique de cette relation est donnée par l'équation :

$$\vec{F}_a = (-\lambda\Delta p - \mu\dot{p})\vec{k}_a, \quad (3.2)$$

où $\vec{F}_a$ est la force appliquée par la relation sur la particule a , λ la raideur du ressort, qui représente la rigidité de l'objet simulé par opposition à la traction, Δp la différence entre la position relative actuelle des deux particules et leur position à l'état de l'équilibre (p_0 représente cette position d'équilibre), μ la viscosité de la matière, $\dot{p}$ la vitesse relative des deux particules, et enfin $\vec{k}_a$ le vecteur directeur, dont la direction est la droite formée par les deux particules. On note cette relation par LS^1 (figure 3.2).

Le choix d'un tel type de relation est justifié par la courbe de traction des objets [22]. Cette courbe représente la relation entre la valeur de la force qui agit sur une tige et la déformation en longueur de cette tige. On peut voir sur cette courbe trois régimes : un régime linéaire qui peut s'approcher du comportement d'un ressort, et deux

¹ "Linear Spring".

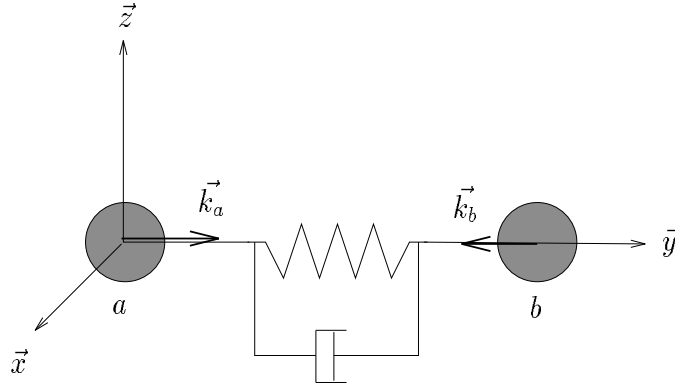


FIG. 3.2 - : Relation de type LS . Cette relation a un comportement linéaire.

autres régimes qui ne sont intéressants que si l'on veut représenter les déformations non réversibles de l'objet (notamment les cassures, ce qui n'est pas le cas ici).

Limitations des relations LS . Bien que le modèle des ressorts ait un comportement correct, il a cependant besoin d'une grande discrétisation des particules et liaisons. En fait, la relation binaire de ressort est une relation pauvre qui ne fixe qu'un seul degré de liberté (figure 3.3), c'est-à-dire la distance entre deux masses ponctuelles. Pour fixer les trois degrés de liberté d'une masse, il faut la lier à au moins trois autres masses non co-planaires. La figure 3.4 montre le moyen de fixer tous les degrés de liberté d'une particule. Cela implique qu'il faut au moins deux couches de particules pour représenter un objet. Les inconvénients d'une telle représentation sont immédiats, surtout si on veut

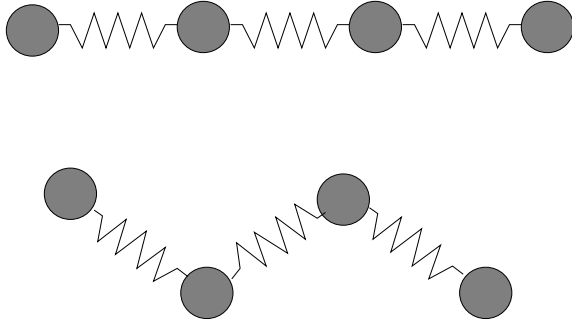


FIG. 3.3 - : La relation $\vec{F} = -\lambda \Delta \vec{P}$ tend à fixer la distance entre deux particules, c'est pourquoi ces deux chaînes sont deux représentations du même objet : la distance entre particules est respectée, mais pas l'orientation.

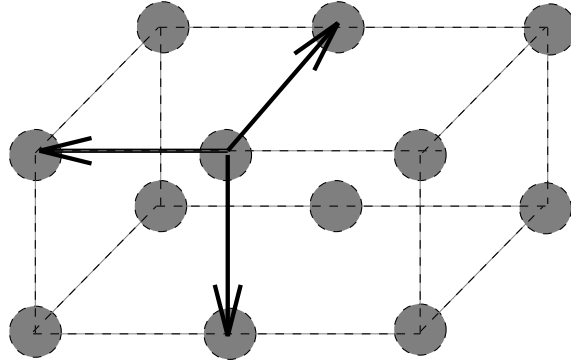


FIG. 3.4 - : Relations croisées : une masse est en relation avec trois autres masses pour fixer tous ses degrés de liberté.

automatiser la modélisation d'un objet à partir d'une représentation CAO ou à partir de données issues de la vision :

1. Le nombre d'éléments constituant l'objet est important. Il ralentit éventuellement l'exécution du programme et peut rendre difficile la construction de l'objet.
2. Dans le cas d'un grand nombre de masses ponctuelles, le choix du nombre de couches et de la géométrie des relations, est à faire si on veut respecter l'isotropie de l'objet.
3. Les relations n'agissent pas dans le même sens (relations croisées), ce qui complique la relation entre les paramètres du modèle et ceux de l'objet de référence. En effet, une relation entre deux masses peut avoir un effet sur l'élasticité d'un objet dans deux directions différentes, d'où une difficulté de plus pour construire le modèle de l'objet (§ 3.4).

Une solution pour optimiser le nombre de masses, et ainsi éviter une discrétisation plus fine, consiste à utiliser des masses "fictives". Une masse fictive est une masse qui n'appartient pas au volume géométrique de l'objet. Elle est liée aux masses réelles pour fixer tous les degrés de liberté (figure 3.5). Cette solution a été utilisée dans [16] pour modéliser les articulations d'un véhicule. Cette utilisation de masses fictives pose aussi quelques problèmes :

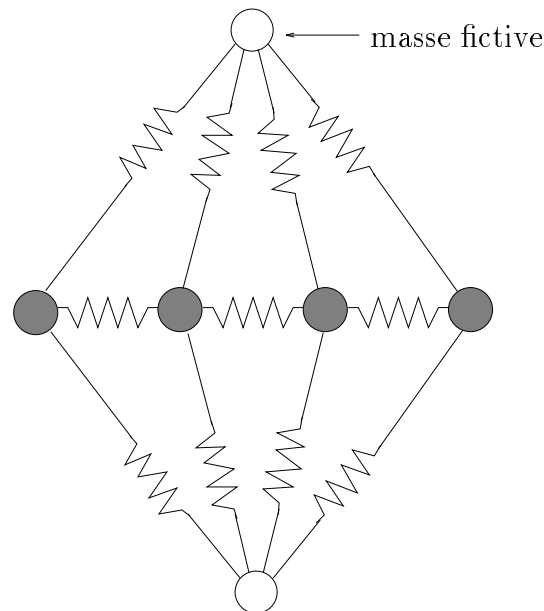


FIG. 3.5 - : Utilisation de masses fictives pour obtenir la linéarité d'une tige.

1. Le centre d'inertie de l'objet va se déplacer vers la masse fictive (R_4 non vérifiée). Si on ajoute une autre masse fictive de l'autre côté, afin de ramener le centre d'inertie à sa position initiale, on ne peut pas assurer que la position relative de

ces deux masses fictives reste la même au cours des mouvements et des déplacements de l'objet. D'où l'introduction d'un nouveau problème : comment fixer les masses fictives ? De plus, il est parfois impossible de ramener le centre d'inertie à sa position initiale, même en ajoutant des masses fictives.

2. Les masses fictives peuvent perturber la masse totale de l'objet (R_8 non vérifiée). Si on répartit la masse totale de l'objet entre masses fictives et non fictives, l'interaction entre les masses voisines va être perturbée à cause du changement local de masse. De plus, il n'existe pas une règle physique permettant de choisir la valeur à donner à une masse fictive.
3. L'existence d'une masse fictive implique l'existence de forces extérieures parasites, dirigées vers les masses fictives.
4. Les masses fictives peuvent perturber la symétrie de l'objet. Un objet isotrope comme le métal, peut être transformé en un objet non isotrope comme le bois. Dans la figure 3.5, garder la symétrie de la tige consiste à ajouter des masses fictives dans toutes les directions possibles.
5. Avec un petit nombre de masses, l'inertie relative d'une masse donnée est assez importante. Une petite déviation d'une masse peut générer des forces parasites dans des directions non prévues. Et dans ce cas, les effets de bord de l'utilisation d'une masse fictive seront plus importants.

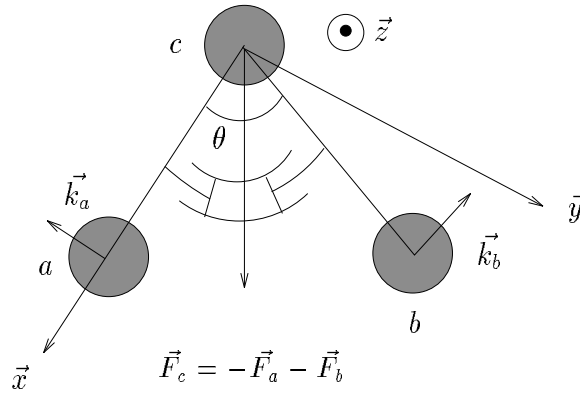


FIG. 3.6 - : Relation de type TS . Cette relation est munie d'un amortisseur angulaire.

Les relations angulaires (notées TS). La solution que nous proposons consiste à ajouter un autre type de relation. Une relation capable, d'une part d'optimiser le nombre des masses ponctuelles et, d'autre part d'éviter les désavantages dus à l'utilisation des masses fictives. Le deuxième type de relation est une relation entre trois masses voisines adjacentes. Elle essaie de fixer l'angle entre deux masses par rapport à une troisième. Cette relation, notée TS ², s'approche du comportement d'un ressort

² "Torsion Spring".

de torsion (fig. 3.6), centré en une masse et dont les deux extrémités sont dirigées vers les deux autres masses. Par analogie au cas précédent, la forme algébrique de cette relation est donnée par la formule suivante :

$$\vec{F}_a = (-\lambda\Delta\theta - \mu\dot{\theta})\vec{k}_a, \quad (3.3)$$

où $\vec{F}_a$ est la force appliquée par cette relation sur la particule non centrale a , λ la raideur du ressort représentant la rigidité de l'objet simulé, par opposition à la flexion, θ l'angle actuel entre les deux masses, $\Delta\theta$ la différence entre θ et leur angle à l'équilibre θ_0 , μ la viscosité de cette relation, $\dot{\theta}$ la vitesse angulaire de la relation, et $\vec{k}_a$ le vecteur directeur perpendiculaire à la relation liant la particule centrale et la particule a (figure 3.6).

On remarque que cette relation représente la réaction de l'objet aux forces de flexion. C'est pour cela que les directions des forces sont perpendiculaires au côté de la relation. Ce côté est normalement parallèle à la surface de l'objet. Comme la somme des forces intérieures doit être nulle, la troisième masse est soumise à une force égale à l'inverse de la somme des forces qui agissent sur les deux autres masses (respect de R_5).

Une représentation possible d'une tige rigide utilisant la nouvelle relation est montrée par la figure 3.7. Les deux relations LS et TS sont définies par deux constantes λ

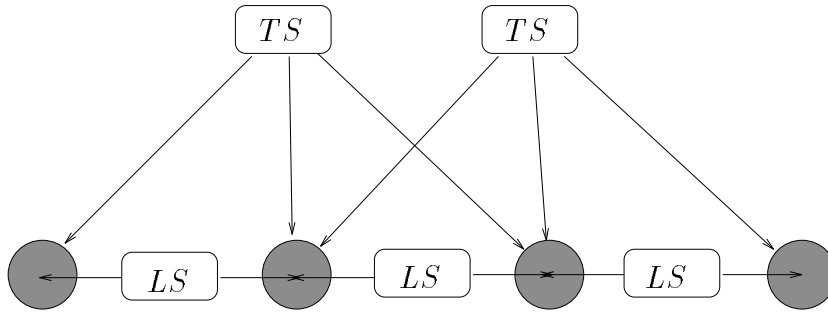


FIG. 3.7 - : Une représentation possible d'une tige rigide.

et μ dont les rôles sont prépondérants :

- (λ) : C'est un facteur de rigidité. Si λ augmente, les efforts à fournir pour déformer les positions relatives entre les particules doivent être plus importants, et la vibration d'une particule autour de sa position d'équilibre plus rapide (figure 3.8).
- (μ) : C'est la viscosité nominale interne. Si μ augmente, la vibration d'un élément autour de sa position d'équilibre diminue. La figure 3.9 montre l'effet de μ sur la trajectoire effectuée par deux éléments, dont la distance relative est déformée de p_0 à p .

Représentation des articulations (rotoïde et prismatique). Une représentation d'une articulation prismatique peut être facilement construite à partir d'une combinaison de relations LS et TS (figure 3.10). Par contre, les relations TS sont définies

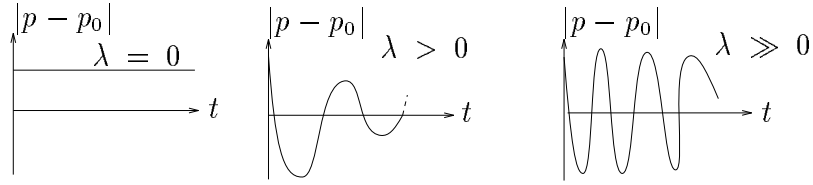


FIG. 3.8 - : Action du facteur de rigidité λ sur le mouvement d'un élément autour de sa position d'équilibre ($\mu \neq 0$).

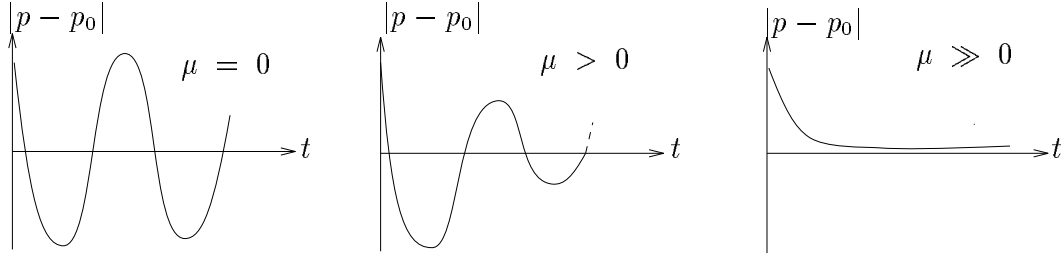


FIG. 3.9 - : Action de la viscosité interne μ sur le mouvement d'un élément autour de sa position d'équilibre.

entre 0 et π . Une représentation d'une articulation, intégrant le comportement réactif aux forces de torsion dont l'angle varie entre 0 et 2π , ne peut pas être donnée par une seule relation de type TS . Il faut munir une relation TS d'un vecteur $\vec{n}$ qui détermine la direction positive de rotation et nous permet de distinguer l'angle $\theta = 0$ de l'angle $\theta = 2\pi$. La figure 3.10 illustre le cas.

En résumé, la force d'une articulation est donnée par l'équation suivante :

$$\vec{F}_a = (-\lambda(\theta - \theta_0) - \mu\dot{\theta})\vec{k}_a$$

où

$$\theta = \begin{cases} \arccos(2\pi - \vec{i} \cdot \vec{j}) & \text{Si } (\vec{i} \wedge \vec{j}) \cdot \vec{n} < 0 \\ \arccos(\vec{i} \cdot \vec{j}) & \text{Sinon} \end{cases} \quad \vec{k}_a = \vec{n} \wedge \vec{j}$$

Cette force dépend de θ_0 et son but est d'amener l'articulation à la position pour laquelle $\theta = \theta_0$.

Le mouvement d'une articulation est commandé par la valeur du paramètre θ_0 de la relation de type TS représentant cette articulation. Si la main est dans une position d'équilibre à θ_0 , le mouvement de l'articulation consiste à ajouter $\Delta\theta$ à θ_0 ($\theta = \theta_0 + \Delta\theta$). Une force va essayer de ramener la valeur articulaire θ à la position θ_0 . La valeur de cette force est proportionnelle à $(\theta - \theta_0)$. Il faut alors s'assurer que cette force ne soit pas trop importante, sinon l'objet risque de se retrouver dans une position incohérente. Pour empêcher cette incohérence, quand la valeur $\Delta\theta$ est très grande, on discrétise la trajectoire entre θ_0 et $\theta_0 + \Delta\theta$.

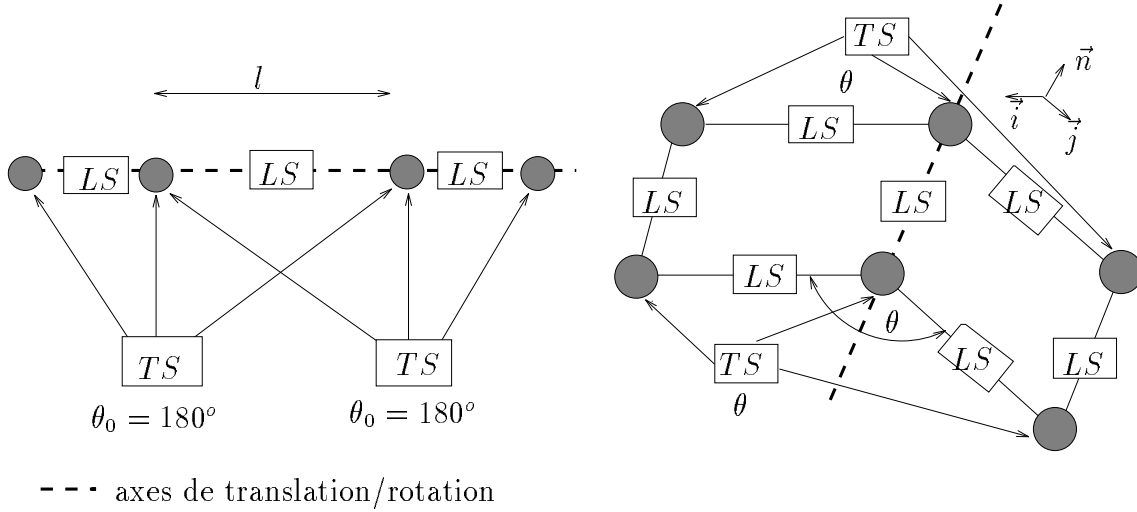


FIG. 3.10 - : Construction des articulations: (a) modélisation d'une articulation en translation, (b) modélisation d'une articulation en rotation. l représente la valeur de la translation et θ est la valeur angulaire de la rotation.

3.2.3 Le mouvement

Le modèle que l'on vient d'étudier nous permet de calculer les forces intérieures agissant sur chaque masse ponctuelle. Pour les masses qui sont en interaction avec le milieu d'évolution, nous sommes capables de trouver les forces extérieures qui agissent sur elles. Nous utilisons la loi générale de la dynamique pour calculer le mouvement de chacune de ces masses. Le mouvement global de l'objet sera une conséquence du mouvement de ses composants élémentaires. Pour cela, la loi de la dynamique est discrétisée par rapport au temps.

3.2.3.1 Discrétisation de la loi générale de la dynamique

La loi générale de la dynamique est donnée sous la forme suivante : $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ (eq. 3.1). On transforme cette loi en la mettant sous la forme de différences finies en discrétisant la vitesse et l'accélération par rapport au temps :

$$\vec{\gamma}_t = \frac{\vec{V}_t - \vec{V}_{t-1}}{\Delta t} \quad (3.4)$$

$$\vec{V}_t = \frac{\vec{P}_t - \vec{P}_{t-1}}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Où $\vec{V}_t$ est la vitesse à l'instant t , $\vec{P}_t$ la position à l'instant t , et Δt est un pas de temps. Après avoir substitué les valeurs de $\vec{V}$ et $\vec{\gamma}$ dans l'équation (3.1), on arrive à l'équation suivante :

$$\vec{P}_t = \frac{\Delta t^2}{m} * F_{ext} + 2\vec{P}_{t-1} - \vec{P}_{t-2} \quad (3.6)$$

Cette formule nous permet de calculer la nouvelle position à l’instant t d’une masse ponctuelle, à partir de sa position aux instants $t - 1$ et $t - 2$, et des forces qu’elle subit. Cette loi doit être appliquée en parallèle sur toutes les masses pour obtenir la nouvelle position de l’objet, sinon le centre d’inertie peut bouger à cause des forces intérieures (respect de R_6).

3.2.3.2 Complexité

Pour définir la nouvelle position d’un objet, il faut passer en revue toutes les relations et calculer les forces appliquées sur chaque particule, puis pour chaque particule, calculer sa nouvelle position. Si nr est le nombre de relations et np le nombre de particules, le temps de calcul est proportionnel à $nr + np$. Normalement, np et nr sont proportionnels. Cette proportion est liée au maillage utilisé. Pour un maillage 3D : $nr > 3np$. Par conséquent, on peut décrire la complexité du mouvement d’un objet par $T(np) = O(np) = O(nr)$. On remarque que cet algorithme est totalement parallèle, et sa complexité parallèle est $O(1)$: à chaque instant, une particule subit les forces extérieures (si elles existent) et subit les forces “intérieures” de chacune de ses voisines (celles avec qui elle est en relation). Les informations nécessaires (forces et positions) sont calculées aux pas $t - 1$ et $t - 2$.

3.2.3.3 Choix du pas d’échantillonnage Δt

La mise sous forme de différences finies de la loi de la dynamique implique que la somme des forces extérieures est constante pendant Δt , ce qui n’est pas toujours le cas. Cela introduit le problème de la position cohérente des objets à un instant donné.

Si Δt augmente, les positions intermédiaires de l’objet ne sont plus cohérentes. En effet, quelque soit la valeur de Δt , il existe une force $\vec{F}$, capable d’amener une masse donnée m à une distance très éloignée de ses voisines, et par conséquent, cette force peut traduire une position non cohérente. La figure 3.11 montre deux séquences de mouvement d’un objet auquel on applique une force perpendiculaire, qui agit directement sur la première masse. Une séquence discrétisée avec Δt aboutit à une position non cohérente, tandis qu’avec $\frac{\Delta t}{2}$, les distances relatives restent dans le domaine de la linéarité. Autrement dit, la fréquence d’échantillonnage doit être deux fois plus grande que la plus grande fréquence dans la fonction donnant la position d’une particule à chaque instant (eq. 3.6)³, et cela pour que les positions données par la fonction échantillonnée $P(k.\Delta t)$ soient suffisamment proches de celles données par la vraie fonction $P(t)$.

Étant donné que le choix de Δt dépend de la fréquence de la fonction (eq. 3.6), il faut diminuer le pas de temps en fonction de la fréquence. Cependant, cette solution n’est pas toujours satisfaisante du point de vue de l’exécution du programme (il devient alors très lent). Une autre solution approximative consiste à introduire un pas de temps “adaptable”. Elle limite la distance parcourue en Δt au lieu de limiter Δt lui même.

³Théorie de Shannon [20].

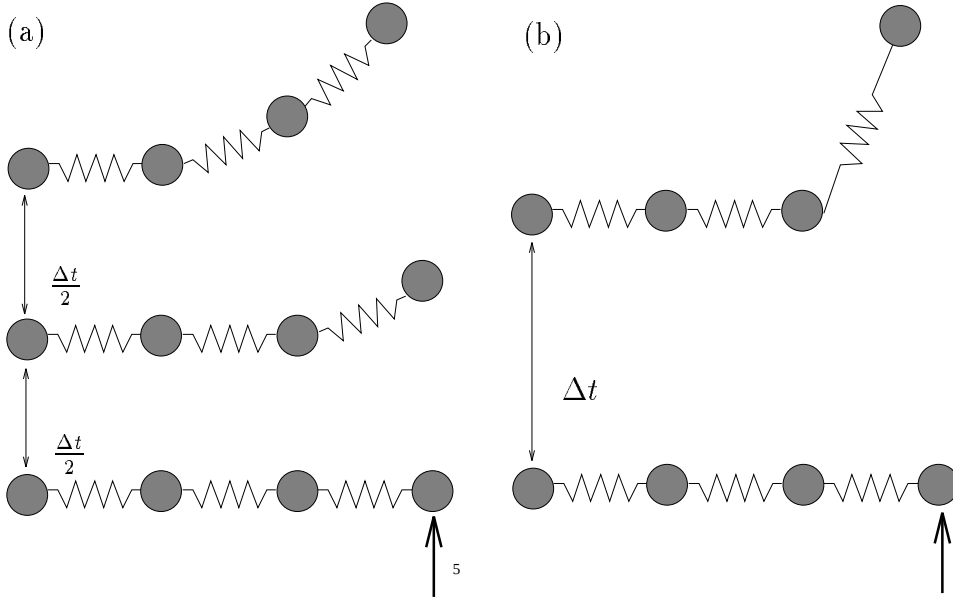


FIG. 3.11 - : (a) Deux étapes de mouvement à $\frac{\Delta t}{2}$. (b) Une seule séquence à Δt . Dans le cas (b), la position n'est pas cohérente : la relation entre les deux premières masses est déformée.

A chaque pas, ΔP est constant mais Δt peut changer. Pour introduire cette notion de temps adaptable, il faut re-discrétiser la loi générale de la dynamique avec un Δt non constant. Les équations s'écrivent alors :

$$\vec{\gamma}_t = \frac{\vec{V}_t - \vec{V}_{t-\Delta t_1}}{\Delta t_1} \quad \vec{V}_t = \frac{\vec{P}_t - \vec{P}_{t-\Delta t_1}}{\Delta t_1} \quad (3.7)$$

$$\vec{V}_{t-\Delta t_1} = \frac{\vec{P}_{t-\Delta t_1} - \vec{P}_{t-\Delta t_1-\Delta t_2}}{\Delta t_2} \quad (3.8)$$

où Δt_1 est la période entre le pas n et le pas $n-1$, et Δt_2 la période entre le pas $n-1$ et le pas $n-2$. On obtient alors :

$$\vec{F} = \frac{m}{\Delta t} \vec{P}_t - \left(\frac{m}{\Delta t_1^2} + \frac{m}{\Delta t_1 * \Delta t_2} \right) \vec{P}_{t-\Delta t_1} + \frac{m}{\Delta t_1 * \Delta t_2} \vec{P}_{t-\Delta t_1-\Delta t_2} \quad (3.9)$$

$$\vec{P}_t = \frac{\Delta t_1^2}{m} \vec{F} + \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} + 1 \right) \vec{P}_{t-\Delta t_1} - \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \vec{P}_{t-\Delta t_1-\Delta t_2} \quad (3.10)$$

On peut alors écrire cette relation sous la forme :

$$\vec{P}_t - \vec{P}_{t-\Delta t_1} = \frac{\Delta t_1^2}{m} \vec{F} + \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right) (\vec{P}_{t-\Delta t_1} - \vec{P}_{t-\Delta t_1-\Delta t_2}) \quad (3.11)$$

A l'instant $t - \Delta t_1$ on connaît, $\vec{F}$, Δt_2 , $\vec{P}_{t-\Delta t_1}$, $\vec{P}_{t-\Delta t_1-\Delta t_2}$ et m . On veut que la distance $\vec{P}_t - \vec{P}_{t-\Delta t_1}$ soit plus petite que la taille du régime linéaire : on

sait, à partir de cette relation, calculer Δt_1 qui vérifie cette condition pour la masse m . On répète le même procédé pour toutes les masses et on prend le Δt_1 minimum.

L'inconvénient de cette solution est que le pas de temps a un effet sur les valeurs des paramètres (viscosité, élasticité) qui définissent l'objet et l'environnement (§3.2.4.3). Un pas de temps variable implique un effet variable sur ces paramètres. Cette solution peut être utile, dans le cas où on trouve une relation qui donne la nouvelle valeur d'un paramètre en fonction de la nouvelle valeur du pas du temps.

Cette solution possible de "temps adaptatif" n'a pas été testée, mais méritait une réflexion, et fera l'objet d'extensions futures.

3.2.4 Interactions entre les objets

Quand les objets sont en mouvement, ils peuvent interagir les uns envers les autres. On distingue dans la suite trois types d'interaction entre les objets : la collision entre eux, le frottement entre deux objets en contact, et l'interaction entre un objet et le milieu dans lequel il évolue (viscosité).

3.2.4.1 La collision

La collision entre deux objets est considérée comme le résultat de l'interaction entre leurs particules élémentaires. Deux masses ponctuelles appartenant à deux objets différents sont en collision si la distance entre elles est plus petite que la somme des rayons des zones qui les entourent. Dans Cordis-Anima, la force d'interaction est exprimée comme suit [17] :

$$\vec{F}_c = \begin{cases} (-\lambda \Delta d & \text{If } \Delta d < 0 \\ \vec{0} & \text{Else} \end{cases}$$

Cette relation ne représente que la collision purement élastique entre les particules, sans aucune dissipation de l'énergie, ce qui n'est pas réaliste. Les déformations des objets (fig. 3.12) au moment du contact sont à l'origine de la force de la collision. Ces déformations changent la position d'équilibre des relations internes (LS et TS), et produisent une force visco-élastique dont la forme est :

$$\vec{F}_c = \begin{cases} (-\lambda \Delta d - \mu \dot{d}) \vec{k} & \text{If } \Delta d < 0 \\ \vec{0} & \text{Else} \end{cases} \quad (3.12)$$

où λ est une constante qui représente la rigidité de la collision, Δd la variation de la distance entre les deux particules, μ une constante représentant la dissipation de l'énergie, $\dot{d}$ la vitesse relative des particules, et $\vec{k}$ un vecteur dirigé d'une particule vers l'autre.

En fait les particules qui constituent un objet physique ne sont pas des représentations canoniques de l'objet. Chaque particule physique représente une grande quantité de vraies particules. Quand deux particules sont en collision, elles s'interpénètrent. Cette interpénétration n'est que le résultat d'une déformation locale de ces deux particules. Cela justifie le choix de la forme de la force de collision. Si $\mu = 0$ alors la collision

entre les particules est purement élastique. Si $\lambda = 0$ alors la collision est purement plastique.

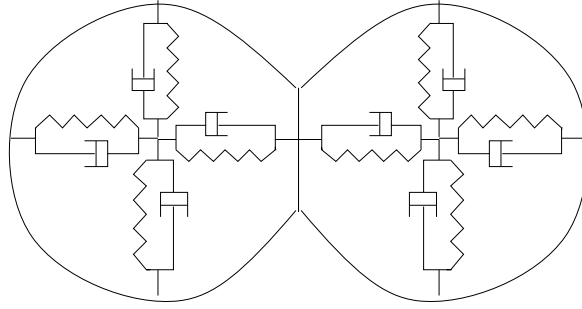


FIG. 3.12 - : Force de collision.

Complexité. Pour étudier la collision entre deux objets, il faut tester la collision de chaque paire de particules i et j telles que i appartient au premier objet et j appartient au deuxième objet. Si n est le nombre de particules constituant un objet, alors il faut n^2 opérations pour calculer la collision entre deux objets. Comme seules les particules de la surface de l'objet peuvent entrer en collision avec d'autres particules, et si m représente ce nombre, le nombre d'opérations sera de l'ordre de m^2 . Sachant que $m = n^{\frac{2}{3}}$ la complexité sera $O(n^{\frac{4}{3}})$. Cette complexité n'est pas satisfaisante car elle est plus grande que la complexité du mouvement de l'objet. Donc l'interaction entre les objets va ralentir considérablement le temps d'exécution. La solution consiste à décomposer l'objet d'une manière récursive (fig. 3.13), proche d'une décomposition octree dont l'élément de base est la sphère. Cette décomposition n'intervient qu'une seule fois au moment de la construction de l'objet. L'algorithme est le suivant :

1. L'objet est composé d'une seule particule. La particule est une feuille de l'arbre (test d'arrêt).
2. L'objet est composé de plusieurs particules. Soit P le centre d'inertie de cet objet. On encapsule l'objet par une sphère, dont le centre est P et le rayon r . Le rayon r est calculé de manière à contenir totalement l'objet (même quand l'objet se déforme). Cette sphère représente un nœud de l'arbre.
3. Décomposer la sphère précédente en huit zones et appliquer la procédure (goto 1) sur chaque groupe de particules (huit groupes, un groupe == un objet) appartenant à chaque zone.

La complexité de cette décomposition est de $n * \log_8(n)$. En effet, à chaque niveau de l'arbre, il faut n opérations pour calculer les centres d'inertie de tous les sous-objets. La profondeur de l'arbre est égale à $\log_8(n)$.

Soient $Sph_8(O)$ l'arbre représentant le résultat de la décomposition de l'objet O , dont chaque nœud est une sphère, et $fil_8(Sph_8(O))$, un des huit fils d'un nœud de l'arbre.

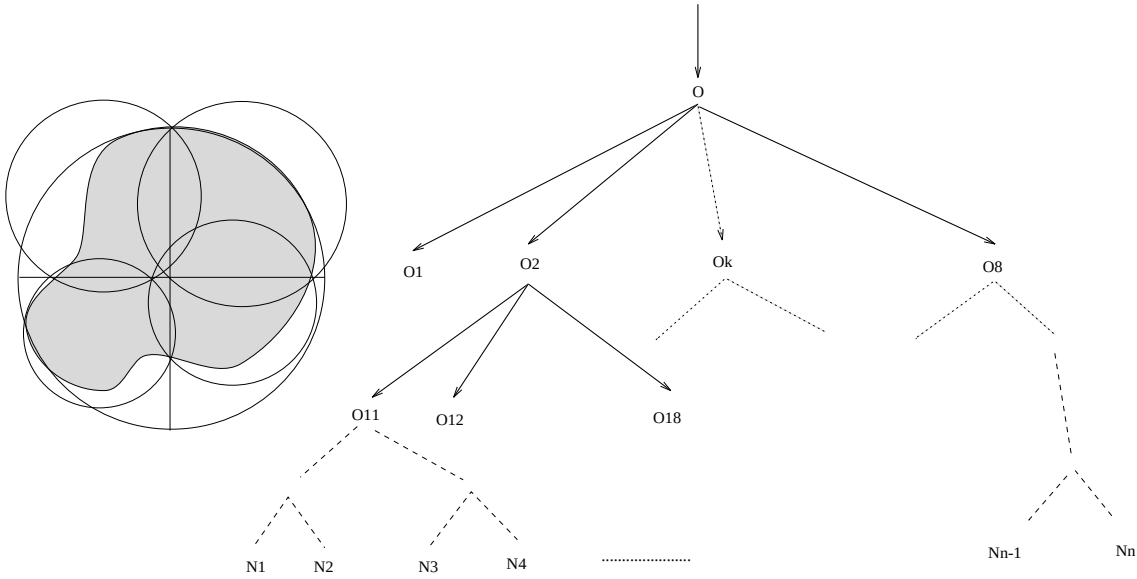


FIG. 3.13 - : Décomposition hiérarchique d'un objet en sphères.

Pour localiser les points de contact entre deux objets à chaque pas du temps, on applique l'algorithme décrit figure 3.14.

Soient C le nombre moyen de couples $[fils_i(Sph_8(O_1)), fils_j(Sph_8(O_2))]$ qui sont en

```

Algorithme Localiser_Contact( $Sph_8(O_1), Sph_8(O_2)$ )
debut
  si  $Sph_8(O_1)$  et  $Sph_8(O_2)$  pas en contact alors
    retour;
  fin si
  si  $Sph_8(O_1)$  et  $Sph_8(O_2)$  en contact alors
    si  $Sph_8(O_1)$  et  $Sph_8(O_2) ==$  feuille alors
      traiter contact; retour;
    fin si
    pour  $fils_i(Sph_8(O_1)), i \in [1, 8]$  alors
      pour  $fils_j(Sph_8(O_2)), j \in [1, 8]$  alors
        Localiser_Contact( $fils_i(Sph_8(O_1)), fils_j(Sph_8(O_2))$ );
      fin pour
    fin pour
  fin si
fin

```

FIG. 3.14 - : Algorithme "Localiser_Contact"

contact, et $T(n)$ le nombre d'opérations nécessaires pour exécuter l'algorithme 3.14. La complexité s'écrit alors :

$$T(1) = 1$$

$$T(n) = (64 - C) + C * T(\frac{n}{8})$$

Pour simplifier le calcul on sur-estime la valeur de $T(n)$ et on peut écrire :

$$T(n) = 64 + C * T(\frac{n}{8})$$

$$T(n) = 64 + 64 * C + C^2 * T(\frac{n}{8^2})$$

$$T(n) = 64 + 64 * C + \dots + 64 * C^{k-1} + C^k * T(\frac{n}{8^k})$$

$$T(n) = 64(1 + C + \dots + C^{k-1}) + C^k * T(\frac{n}{8^k})$$

Comme $T(\frac{n}{n}) = T(1) = 1$ on peut écrire :

$$T(n) = 64(1 + C + \dots + C^{k-1}) + C^k \mid k = \log_8(n)$$

En sur-estimant C^k par $64 * C^k$ on obtient :

$$T(n) = 64(1 + C + \dots + C^{k-1} + C^k) \mid k = \log_8(n) \quad (3.13)$$

Discussion sur la complexité. On remarque que la terme C^k est de l'ordre de grandeur du nombre de points qui sont vraiment en contact. Tandis que le terme $64(1 + C + \dots + C^{k-1})$ est de l'ordre de grandeur des opérations qui ne conduisent pas à de vrais contacts. Comme le premier terme est plus grand que le second (voir équation 3.14), alors la complexité est déterminée par les vrais points en contact, et par conséquent, l'algorithme est optimal. La valeur de C dans l'équation 3.13, dépend du type de contact entre les deux objets :

- Si $C = 1$, le contact entre les deux objets est un contact ponctuel (le cas le plus favorable). La complexité devient $T(n) = O(\log_8(n))$.
- Si $C \neq 1$, l'équation 3.13 peut être ré-écrite sous la forme :

$$T(n) = 64(\frac{1 - C^{k+1}}{1 - C}) \mid k = \log_8(n)$$

Pour k assez grand on a : $T(n) = 64 * C^{\log_8(n)}$ avec $\log_8(n) = \frac{\log_C(n)}{\log_C(8)}$:

$$T(n) = n^{\log_C(8)} \quad (3.14)$$

Pour chaque type de contact entre deux objets, on peut estimer la valeur de C :

- Si le contact entre les deux objets est un contact arête/arête, on peut estimer la valeur de C à 2. Donc $T(n) = O(n^{\frac{1}{3}})$. Sachant que le nombre de points sur une arête d'un objet (dont le volume est n) est égale à $n^{\frac{1}{3}}$, l'optimalité de cet algorithme est vérifié.

- Si le contact entre les deux objets est un contact surface/surface, on peut estimer la valeur de C à 4. Donc $T(n) = O(n^{\frac{2}{3}})$. Sachant que le nombre de point sur une face d'un objet (dont le volume est n) est égale à $n^{\frac{2}{3}}$, l'optimalité de cet algorithme est vérifié.
- Si on suppose que $n = 8$ alors $T(n) = O(n)$. Cela correspond au cas extrême où les deux objets se réduisent à deux surfaces simples.
- Si on suppose que $n > 8$ alors $T(n) > n$. Il est impossible de localiser plus de n points de contact entre deux objets, chacun contenant n particules.

Comme la complexité maximale de cette algorithme est plus petite que la complexité du mouvement, la complexité du modèle physique reste celle déterminée par le mouvement, et est égale à $O(n)$, où n est le nombre de particules de chaque objet.

3.2.4.2 Le frottement

Quand des corps entrent en collision, on doit tenir compte du frottement. Le frottement est une notion statistique. C'est la somme d'un très grand nombre d'interactions microscopiques entre les particules des deux objets en interaction. En pratique, il est impossible de tenir compte de ces interactions microscopiques : elles demandent une discrétisation trop fine pour représenter les déformations.

Un autre procédé consiste à considérer ces forces d'une manière "collective", au moyen d'une méthode expérimentale. La force de frottement peut être considérée, pour la plupart des applications, comme proportionnelle à la norme de la force normale $|F_n|$ appliquant un corps contre un autre (lois de Coulomb), suivant la direction de la vitesse relative d'un objet par rapport à l'autre [1]. Ce qui nous intéresse, c'est l'interaction entre les masses ponctuelles, et dans ce cas, on sait que la direction du mouvement est toujours dans le plan tangent au point d'interaction entre deux particules (figure 3.15).

La force de frottement entre deux masses ponctuelles est proportionnelle à la force normale exercée par l'une sur l'autre. Sa direction est inverse à la direction de la vitesse relative des deux masses. Au cas où la vitesse relative des deux objets ne serait pas nulle, cette force peut être donnée par la relation suivante :

$$\vec{F}_{fc} = -c |\vec{F}_n| \frac{|\vec{V}|}{\vec{V}}$$

où $\vec{F}_{fc}$ est la force de frottement cinétique, c le coefficient cinétique du frottement, $\vec{F}_n$ la force normale exercée par l'une des deux masses sur l'autre, et $\vec{V}$ la vitesse relative des deux masses ponctuelles.

Si la vitesse relative des deux masses est nulle, on remplace le coefficient cinétique du frottement c par le coefficient statique du frottement s (normalement $s > c$). Dans ce cas, la direction de la vitesse n'est pas définie, mais a potentiellement la même direction que la force tangente exercée par l'une des deux masses sur l'autre. La force

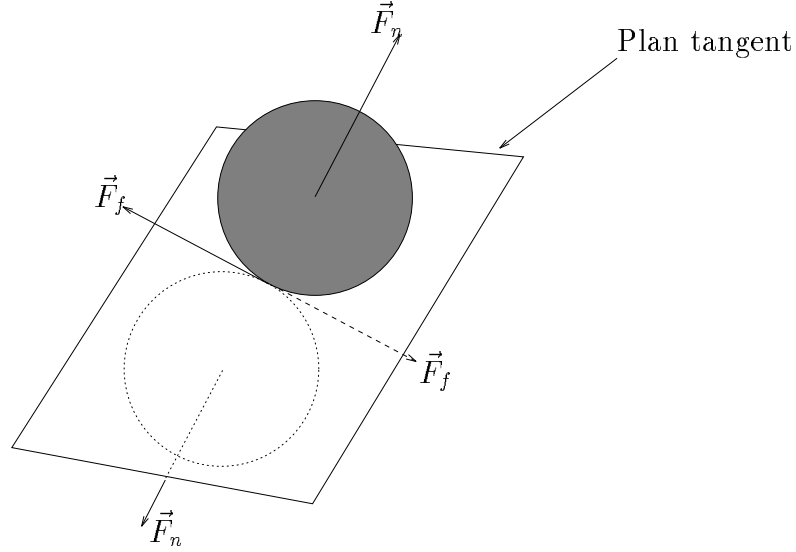


FIG. 3.15 - : Représentation du frottement entre deux masses ponctuelles. $\vec{F}_n$ est la force normale appliquée au centre des sphères et $\vec{F}_f$ est la force de frottement.

de friction statique peut être alors donnée par la relation suivante :

$$\vec{F}_{fs} = -s \frac{|\vec{F}_n|}{|\vec{F}_t|} \vec{F}_t$$

Le frottement statique est très utile dans plusieurs applications, notamment dans le cas de la stabilité des interactions doigts/objet (§ 4.3).

En résumé, la force de frottement est donnée par :

$$\vec{F}_f = \begin{cases} -c |\vec{F}_n| \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} & \text{Si } \vec{V} \neq 0 & (\text{Cas de glissement}) \\ -s |\vec{F}_n| \frac{\vec{F}_t}{|\vec{F}_t|} & \text{Si } |\vec{F}_t| > s |\vec{F}_n| & (\text{Cas intermédiaire}) \\ -\vec{F}_t & \text{Sinon} & (\text{Cas d'adhérence}) \end{cases} \quad (3.15)$$

Il existe normalement une force de frottement parasite entre deux objets physiques, étant donné que leurs surfaces ne sont jamais parfaitement lisses. Dans notre approche, pour éviter de prendre en compte cette force parasite due à la discrétisation des objets, on retranche sa valeur à la valeur réelle du frottement calculée par la relation 3.15⁴.

Comme les forces de frottement dépendent des forces normales, elles doivent être calculées en parallèle. Il faut d'abord calculer toutes les forces appliquées sur toutes les particules, puis calculer les forces de frottement. Sinon on obtient un comportement non symétrique, et la stabilité n'est plus assurée.

⁴Une autre approche consiste à représenter le frottement statique par un ressort qui lie les deux objets en collision[13].

3.2.4.3 La viscosité du milieu

Cette viscosité du milieu ne doit pas être confondue avec la viscosité des relations entre les particules, qui dépend de la collision entre ces mêmes particules, et qui est proportionnelle à la vitesse relative de deux particules voisines. La viscosité énoncée ici, dépend de la matière du milieu dans lequel l'objet évolue (air, eau, vide), et est proportionnelle à la vitesse absolue de l'objet.

Le milieu dans lequel le mouvement a lieu (air, eau, vide, etc...) essaie toujours d'empêcher ou de freiner le mouvement. En fait, des collisions existent entre les particules qui constituent l'objet et celles qui constituent le milieu. La représentation de ces collisions implique la construction d'un modèle physique du milieu lui même. Or, le modèle physique d'un fluide, par exemple, est coûteux en particules. Une optimisation possible de ce problème consiste en la modélisation des forces de collision par une relation mathématique : les mécaniciens considèrent toujours que la force de collision avec le milieu peut être approchée (Pour des petites vitesses) par la relation suivante : $\vec{F} = -k \vec{V}$, où k est la viscosité du milieu et $\vec{V}$ la vitesse de la masse qui se déplace dans ce milieu⁵.

La loi de la dynamique peut s'écrire alors sous la forme : $\vec{F}_{ext} - k * \vec{V} = m \vec{\gamma}$. La mise sous forme de différence finie de cette relation nous donne :

$$\vec{P}_t = \frac{\Delta t^2}{m} * \vec{F}_{ext} + (2 - \frac{k * \Delta t}{m}) * \vec{P}_{t-1} - (1 - \frac{k * \Delta t}{m}) * \vec{P}_{t-2} \quad (3.16)$$

où $\vec{F}_{ext}$ est la somme des forces extérieures agissant sur la masse m . L'utilisation d'un pas de temps adaptable dans l'équation (3.16) donne l'équation suivante :

$$\vec{P}_t = \frac{\Delta t_1^2}{m} \vec{F} + (\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} + 1 + k \frac{\Delta t_1}{m}) \vec{P}_{t-\Delta t_1} - (\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} + k \frac{\Delta t_1}{m^2}) \vec{P}_{t-\Delta t_1-\Delta t_2}$$

La prise en compte de la viscosité du milieu est très importante. Elle explique à elle seule le mouvement de rotation des objets en chute libre. Un objet ne subissant que la force de pesanteur n'a aucune raison de tourner. L'accélération de tous ses composants est la même, et par conséquent la vitesse de tous ces points est aussi la même (c'est la définition de la translation).

La viscosité du milieu est une force qui n'a pas une distribution uniforme sur l'objet. Elle est nulle pour les masses ponctuelles qui ne sont pas en contact avec le milieu, et ce, dans la direction du mouvement (figure 3.16). La direction de cette force dépend de la vitesse de la particule en question. Ainsi, la viscosité donne des accélérations différentes aux points constituant l'objet. L'objet ne se stabilise que si la vitesse de toutes ses particules est la même.

3.2.4.4 Choix de la valeur de la viscosité

L'échantillonnage du temps pose aussi des problèmes pour la représentation de la viscosité du milieu. Normalement, la viscosité k du milieu varie entre 0 et ∞ . A cause

⁵Pour des grandes vitesses il faut prendre en compte la vitesse au carré : par exemple $\vec{F} = -k_1 \vec{V} - k_2 \vec{V}^2$

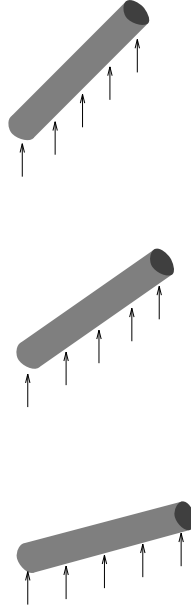


FIG. 3.16 - : Forces de viscosité qui agissent sur un cylindre en chute libre.

de la discrétisation du temps, elle ne peut pas dépasser une valeur égale à $\frac{m}{\Delta t}$. Si on donne à k une valeur plus grande que $\frac{m}{\Delta t}$, l'objet va reculer du fait de la force de viscosité (non compatible avec la discrétisation utilisée). La justification est immédiate en ré-écrivant l'équation (3.16) sous la forme suivante :

$$\vec{P}_t - P_{t-\Delta t}^{\rightarrow} = \frac{\Delta t^2}{m} * F_{ext}^{\rightarrow} + (1 - \frac{k * \Delta t}{m})(P_{t-\Delta t}^{\rightarrow} - P_{t-2\Delta t}^{\rightarrow})$$

Si on suppose que les forces extérieures sont nulles, on obtient :

$$\vec{P}_t - P_{t-\Delta t}^{\rightarrow} = (1 - \frac{k * \Delta t}{m})(P_{t-\Delta t}^{\rightarrow} - P_{t-2\Delta t}^{\rightarrow})$$

Cette relation implique que les distances parcourues à chaque pas sont égales si $k = 0$. Les distances décroissent si $0 < k < 1$ et vont croître si $k > 1$. La vitesse va donc augmenter sans effort et sans accélération (logiquement impossible).

Par contre, si Δt est petit ($\frac{m}{\Delta t}$ est grand), k peut prendre n'importe quelle valeur entre :

$$0 < k < \frac{m}{\Delta t}$$

Cela permet de modifier k pour permettre de s'approcher du modèle de référence (§ 3.4).

3.2.5 Exemples de représentation des objets

Pour représenter un objet , on décompose la forme géométrique de cet objet en un nombre de sphères vérifiant les règles décrites au paragraphe 3.2.1 et les propriétés énoncées au paragraphe 3.2.2.1. On associe à chacune de ses sphères une masse vérifiant la règle R_8 et la géométrie de l'objet. On considère ensuite les masses voisines,

auxquelles on associe pour chaque paire, une relation de type LS . De même, à chacune des trois masses voisines, on ajoute une relation de type TS . Si les degrés de liberté d'une masse sont sur-déterminés, on peut éliminer quelques relations avec les voisins pour simplifier le modèle, tout en respectant le caractère isotropique de l'objet. On peut aussi bénéficier de la sur-détermination pour obtenir des objets plus rigides. Le nombre de masses dépend de la forme de l'objet et des tâches qu'on veut réaliser avec.

Les figures 3.17 et 3.18 montrent les représentations possible d'une plaque et d'une tige courbe. Pour représenter le comportement d'un objet dans une direction donnée, il faut modéliser deux couches dans cette direction. L'articulation de la figure 3.18 n'intègre pas le comportement réactif aux forces de torsion. Pour représenter ce type de comportement, il faut une autre couche en parallèle.

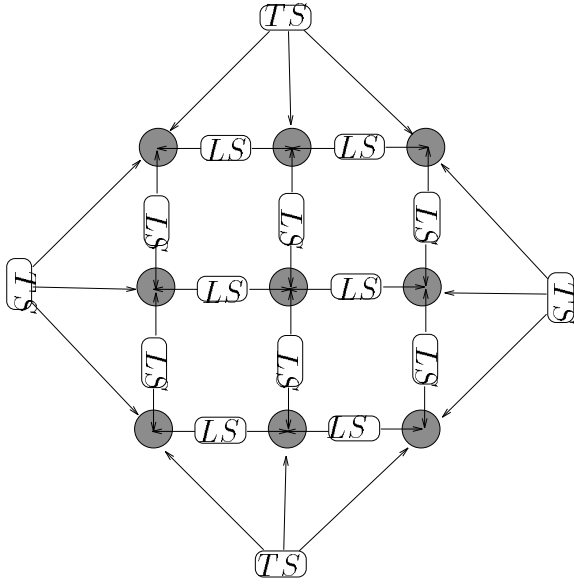


FIG. 3.17 - : Représentation possible d'une plaquette. Deux relations de type TS entre la masse centrale et ses quatre voisins ont été enlevées par redondance.

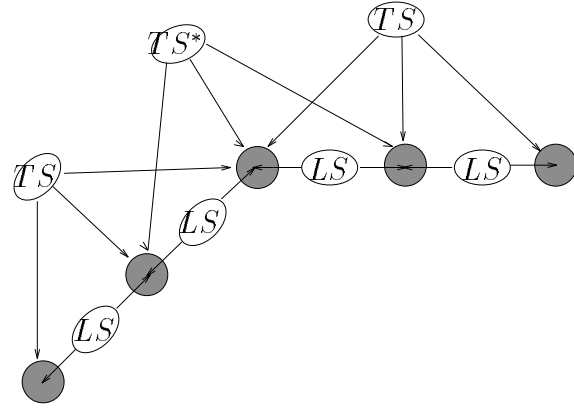


FIG. 3.18 - : Une représentation d'une articulation simple. L'angle initial θ_o de TS^* est différent de 180° : c'est la seule différence avec la représentation d'une tige rigide.

L'automatisation de la représentation d'un objet par modèle physique reste difficile. Il nous faut trouver les relations analytiques qui définissent la transformation entre l'espace de temps continu et l'espace de temps discret. Sinon, l'identification entre un objet réel et un objet simulé reste liée à un pas de temps fixe, et aux forces utilisées pour faire l'identification. De plus, le maillage utilisé pour discrétiser l'objet référence et l'architecture proposée pour lier les particules par les relations, affectent considérablement le comportement de l'objet. La prise en compte de tous ces facteurs, d'une manière automatique ou semi-automatique, reste un sujet de recherche.

3.2.6 Représentation d'une main articulée

Une main articulée est représentée par un ensemble de tiges articulées (figure 3.10). Les tiges sont représentées par deux couches, pour prendre en compte les forces de torsion d'une part, et pour pouvoir représenter les articulations d'autre part (une articulation est une structure bi-dimensionnelle). Pour commander la main, il suffit de faire varier les valeurs θ_0 de ses articulations. Une représentation approximative de la main de Salisbury est présentée figure 3.23. Cette main a été modélisée avec 200 sphères, 200 liaisons de type *LS*, et 300 relations de type *TS*. Le nombre important de relations angulaires a permis d'augmenter la rigidité de la représentation.

3.3 Implantation et expérimentation

Cette partie présente les différents essais effectués pour valider le modèle utilisé. La tige a servi d'objet test, pour montrer la faisabilité de l'utilisation des modèles physiques pour la saisie, et cela pour deux raisons :

1. Une main articulée (pour revenir au but initial) peut être considérée comme une suite de tiges reliées par des articulations.
2. Le jugement, qui nous permet de dire si le mouvement d'un objet modélisé sous forme "physique" est correct par rapport au mouvement du même objet référence, est plus facile à donner, si on utilise un objet simple comme une tige. Ce n'est pas le cas, avec un objet de forme complexe.

3.3.1 Validation expérimentale

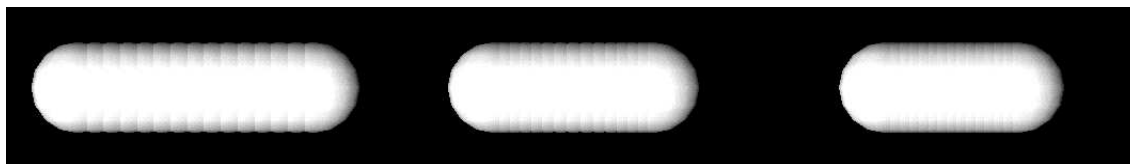


FIG. 3.19 - : Traction d'une tige.

La validation consiste à appliquer sur une tige cinq tests principaux : la traction, la flexion, la torsion, la manipulation par l'intermédiaire de forces extérieures quelconques, et enfin, la collision entre deux objets ⁶.

Essai de traction. Il s'agit de la réaction d'une tige à une force de traction. Ce test a été effectué pour différentes valeurs de viscosité interne (figure 3.19). Le résultat conforte le fait que plus la viscosité interne de cette tige est importante, plus la tige a tendance à revenir plus vite à sa position d'équilibre.

Essai de flexion. Dans ce cas la réaction de la tige soumise à une force de flexion, est de revenir à sa position initiale (figure 3.20).

⁶Il est difficile de transcrire des exemples "visuels" par des figures papiers.

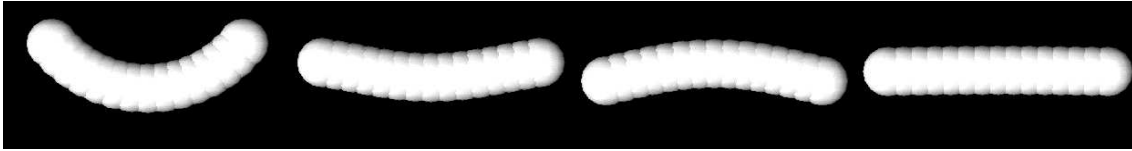


FIG. 3.20 - : Flexion d'une tige.

Essai de torsion. Pour représenter la réaction d'une tige aux forces de torsion, on ajoute à la tige une seconde couche de particules élémentaires. De même que dans l'exemple de traction, la tige retourne d'autant plus vite à sa position initiale que la viscosité interne augmente.

Interactions. Plusieurs tests d'interaction ont été effectués. La figure 3.21 montre un test de collision entre une tige et le sol. La figure 3.22 montre une roue qui avance sous l'effet de la pesanteur. Son mouvement de rotation est dû seulement à la force de frottement avec le sol.

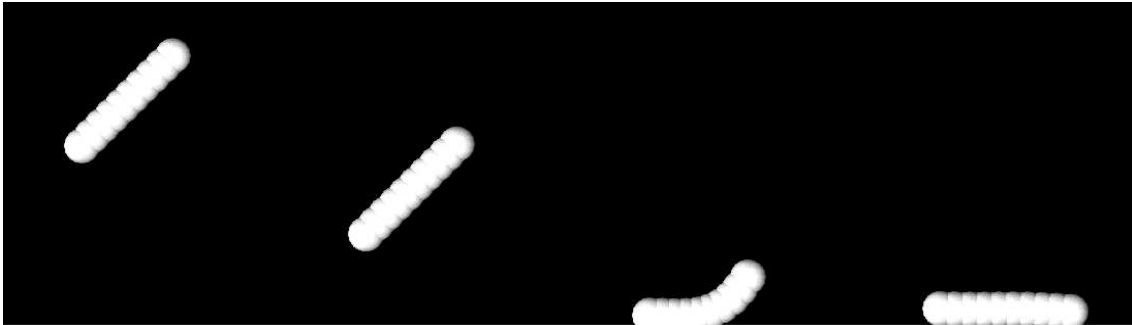


FIG. 3.21 - : Décomposition de la chute d'une tige (avec vitesse initiale), et interaction avec le sol.

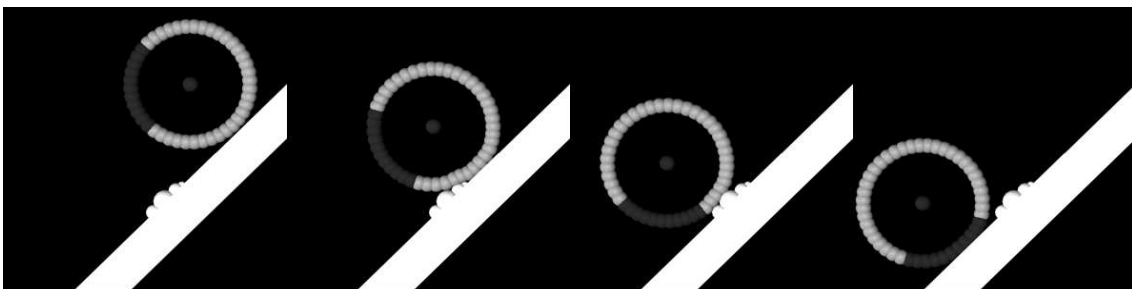


FIG. 3.22 - : Roue subissant la force de pesanteur. L'effet de la rotation est dû aux frottements avec le sol incliné.

Interaction main/objet. La figure 3.23 montre un exemple dans lequel une main articulée essaie de saisir une balle. Cet objet va glisser. Les forces d'interactions

(contact pulpaire) tendent à pousser la balle vers l'extérieur de la main. De plus, la force de frottement entre la main et l'objet n'est pas suffisante. On peut remédier à cette situation de deux manières différentes :

1. En utilisant un contact palmaire. Pour obtenir ce contact, la position initiale de la main a changé, pour que les forces d'interaction poussent l'objet à l'intérieure de celle-ci, multipliant ainsi les contacts entre la main et l'objet. Dans ce cas, la balle entre en collisions successives avec la main jusqu'à stabilisation. Elle est géométriquement coincée dans la main (fig. 3.24). La prise palmaire ne pouvait pas être prise en compte sans considérer toutes les contacts possibles calculés par le modèle physique.
2. En augmentant la force de frottement. Dans ce cas, même en utilisant un contact pulpaire, la balle se stabilise sous l'effet des forces de frottement avec la main (fig. 3.25).

Cet exemple montre l'importance d'une bonne évaluation des paramètres du modèle, mais les relativise par rapport à un bon placement initial de la main par rapport à l'objet. Dans les deux cas de figure, et avec les mêmes paramètres (notamment les paramètres liés à la friction), les comportements obtenus sont différents. Dans un cas on obtient un échec, dans l'autre un succès pour la saisie de l'objet. Même si dans le second cas, l'objet a bougé.



FIG. 3.23 - : Glissement d'une balle au moment de la saisie avec une main articulée. Glissement causé, soit par de mauvais paramètres de contrôle (ici, les paramètres liés à la friction), soit par une mauvaise configuration initiale avant la saisie.

3.4 Identification des paramètres du modèle

Le modèle que l'on vient de proposer permet de représenter les objets d'une manière proche de leur construction naturelle, mais aussi, proche de leur comportement face aux événements extérieurs, et ce, par le respect des lois physiques qui leurs sont applicables. Dans la nature, il y a une infinité d'objets qui ont le même modèle géométrique, mais il n'y a pas deux objets qui ont les mêmes propriétés physiques. Ces propriétés dépendent, non seulement de l'historique de l'objet (histoire de sa construction), mais aussi de sa géométrie microscopique (le frottement microscopique entre deux objets peut être

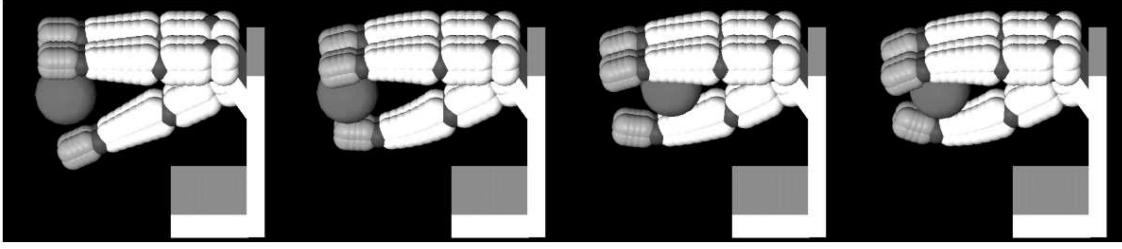


FIG. 3.24 - : Re-positionnement de la main avant la saisie. Ce re-positionnement entraîne une saisie palmaire.

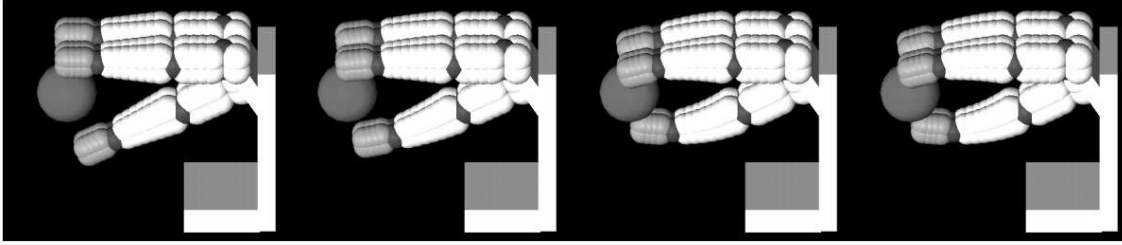


FIG. 3.25 - : Saisie pulpaire d'une balle. Les paramètres liés à la friction ont été augmentés.

représenté par deux “scies” en interaction). Il n'est pas possible de trouver une relation automatique, qui nous permette de passer de l'objet modèle à l'objet référence, en ne connaissant que sa géométrie et sa matière de fabrication. Ce passage de l'objet modèle à l'objet référence ne peut se faire qu'en identifiant les paramètres qui définissent l'objet modèle, tout en respectant sa forme géométrique. Un apprentissage (ou réglage des paramètres k , Δt , μ et λ de notre modèle) est nécessaire afin d'approcher au mieux la nature et le comportement de l'objet réel.

Le problème essentiel de l'identification des paramètres du modèle physique d'un objet, est lié au fait qu'il existe plus d'une propriété (ou comportement) à identifier. Certaines de ces propriétés dépendent des mêmes paramètres, et la notion de conflit intervient alors. Prenons l'exemple d'un objet modélisé sur la figure 3.26. Les relations affectent la rigidité de l'objet dans les deux directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$ (elles ont des composantes sur les deux axes). Si on augmente la rigidité de l'une des relations, automatiquement cela augmente la rigidité de l'ensemble de l'objet dans les deux directions. Le but consistant à obtenir un objet rigide dans un sens, et “mou” dans l'autre, n'est pas accessible du fait du conflit existant. Une représentation correcte de cet objet, assimilé à une plaque, est modélisée figure 3.17.

Un ordre de grandeur des paramètres, les uns par rapport aux autres est difficilement quantifiable. Les paramètres ne gardent pas leurs valeurs réelles dans l'espace discontinu. Leurs nouvelles valeurs dépendent du pas du temps choisi. De plus, les va-

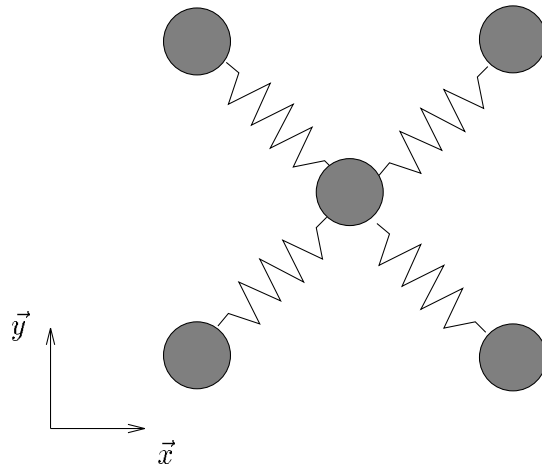


FIG. 3.26 - : Une mauvaise représentation d'une plaque.

leurs ne varient pas dans le même intervalle que les valeurs réelles (cas du facteur de viscosité externe).

Il n'existe pas à l'heure actuelle, un moyen simple de résoudre le problème d'identification. L'utilisation d'objets simples, comme des tiges ou des sphères, apporte une première solution pour résoudre ce problème. Leur comportement est assez "simple" à identifier et nous permet d'extraire quelques relations que l'on peut appliquer à des objets de forme plus complexe, en considérant ces objets complexes comme l'union d'objets canoniques. Le mot "simple" ne s'applique que si nous connaissons et pouvons prévoir, ou calculer, la réaction de ces objets face à des forces extérieures telles la pesanteur, le frottement, etc...

Ceci reste cependant un problème ouvert sur lequel nous sommes en train de travailler.

Chapitre 4

La saisie par une main articulée

4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'utilisation des modèles physiques pour la résolution du problème de la saisie par une main articulée. Nous avons abordé au chapitre 2.1 le problème décisionnel de la saisie. Il se pose en de multiples termes, de configuration de la main, d'accessibilité, de stabilité, et de contexte. Certains de ces problèmes ont été résolus avec le planificateur de pré-configuration (§ 1.2.1). Néanmoins, certains autres persistent, et ne peuvent être résolus sans l'apport d'une composante physique. Cette composante physique nous est apportée par le planificateur physique. Notre but est l'utilisation des modèles physiques pour résoudre, ou aider à résoudre, les problèmes spécifiques qui n'ont pu être résolus par le planificateur de pré-configuration, notamment les problèmes de stabilité. La résolution de ce problème de stabilité nous permettra, soit de valider ou d'invalider telle ou telle prise choisie par le planificateur de pré-configuration, soit, et ce dans une optique de contrôle d'exécution, d'engendrer des comportements réagissant à des interactions main/objet qui ne tendent pas vers la stabilité. Nous allons montrer comment les modèles physiques peuvent résoudre la question de la stabilité, et dans une moindre mesure, les problèmes de manipulation. C'est-à-dire comment, une fois que l'objet est dans la main, on peut l'amener à une nouvelle position avec la main articulée.

La seconde partie de ce chapitre concerne l'expression des contraintes exprimées par le planificateur de pré-configuration, pour le choix d'une prise, dans le modèle utilisé par le planificateur physique. Ces contraintes concernent essentiellement le type de contact à obtenir pour la réalisation de la saisie, le type de prise à effectuer, et une position approximative des doigts sur l'objet. Il s'agit de converger vers une certaine configuration des doigts autour de l'objet, et de s'y maintenir en s'assurant de la stabilité du système main/objet. L'approche utilisée pour la planification globale de saisie est la suivante :

- Utilisation du planificateur de pré-configuration pour amener la main H suivant une configuration initiale près de l'objet O .
- Expression des informations du planificateur de pré-configuration dans le modèle du planificateur physique.

- Utilisation du planificateur physique jusqu'à la stabilisation du système H/O .

4.2 Description “physique” de tâches de manipulation

Il s'agit de faire mouvoir un objet par rapport à une tâche donnée. Plusieurs cas de figures sont possible. On veut, soit amener un objet “physique” à une position donnée, soit amener la main à une position donnée au contact de l'objet, soit enfin manipuler l'objet jusqu'à une position connue, en manœuvrant l'ensemble main/objet. On suppose dans le dernier cas de figure, que la prise a déjà été choisie et que les doigts de la main sont au contact de l'objet.

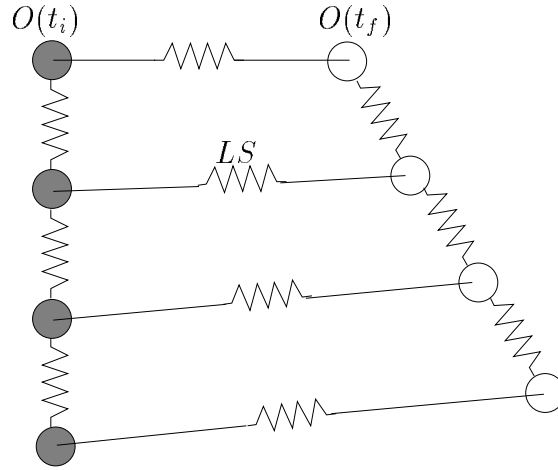


FIG. 4.1 - : Déplacement “physique” d'un objet.

En terme de modèles physiques, quelque soit le cas décrit précédemment, le but est de trouver les forces à appliquer sur l'objet (la main ou l'objet ou l'ensemble main/objet) pour lui permettre d'effectuer le mouvement souhaité, de sa position initiale $O(t_i)$ jusqu'à sa position finale $O(t_f)$. S'il s'agit de la main, on parle alors de configuration initiale $H(t_i)$ et de configuration finale $H(t_f)$. Un moyen pratique pour faire cela, est d'imaginer qu'il existe un objet similaire avec une “masse infinie”, déjà positionné en $O(t_f)$. Il suffit alors de connecter par des relations LS , quatre particules non co-planaires de l'objet à mouvoir à $O(t_i)$ et de l'objet “virtuel” à $O(t_f)$. Les relations LS produisent les forces nécessaires sur O pour atteindre $O(t_f)$. L'objet O ne peut subir que les forces engendrées par les relations LS qui ont été rajoutées, étant donné que l'objet “virtuel” positionné à $O(t_f)$, possède une masse infinie. La figure 4.1 illustre le cas pour un objet simple. Il faut lier au moins quatre particules de l'objet réel à quatre particules de l'objet fictif pour contraindre complètement l'orientation de l'objet.

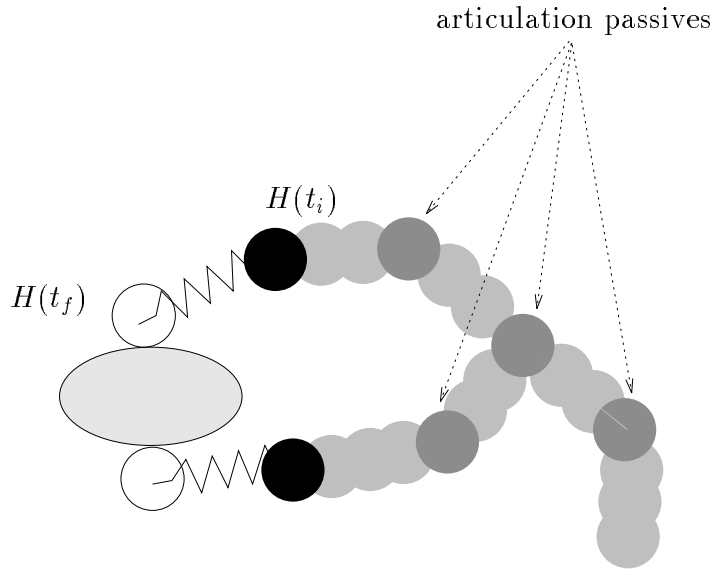


FIG. 4.2 - : Planification physique du mouvement d'une main articulée attirée par des bouts de doigts fictifs.

La même approche peut être utilisée pour le cas d'une main articulée, avec toutefois quelques petites contraintes supplémentaires au niveau des articulations. En effet, il ne s'agit pas de configurer une seconde main articulée virtuelle à $H(t_f)$, mais seulement d'y positionner fictivement les bouts des doigts. Cette opération ne peut être envisagée que si la position finale des doigts sur l'objet est connue. Pour obtenir le mouvement escompté, il faut rendre les articulations des doigts passives. Une articulation passive est une articulation dont le facteur de rigidité est nul. Par contre, le facteur de viscosité ne doit pas être nul, sous peine de voir la main continuer à bouger bien que la position finale soit atteinte. Dans ce type de mouvement, avec des articulations passives, il est possible de donner des priorités aux articulations. En effet, si le même facteur de viscosité est appliqué à toutes les articulations, elles vont toutes bouger en même temps. Ce qui peut être "coûteux" si la main est montée sur un bras de robot, car celui-ci bougera aussi. En mettant un facteur de viscosité plus petit sur les articulations proches des doigts, et de plus en plus grand vers la base, on assure un mouvement "optimal" vers le but. L'équilibre est atteint quand les bouts des doigts sont sur la prise choisie. La figure 4.2 illustre le concept. L'exécution du mouvement devient simple : à chaque pas de temps, on lit les déformations $\Delta\theta$ sur une articulation et on calcule la nouvelle force à appliquer sur l'articulation réelle afin de générer le même mouvement.

Le troisième cas de figure (i.e. mouvement objet/main) est une combinaison des deux cas présentés précédemment. On considère que le système objet/main est un seul objet, qui est attiré vers l'objet fictif positionné en $O(t_f)$, par des relations de type LS . Les articulations de la main sont alors passives (cf. figure 4.3).

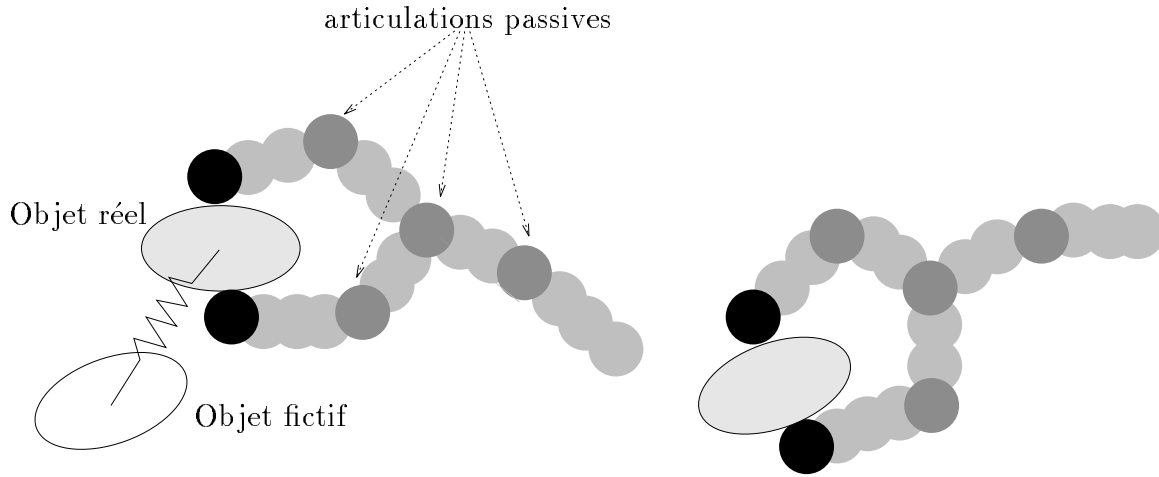


FIG. 4.3 - : Planification du mouvement global objet/main, sous la contrainte d'attraction de l'objet saisi vers une position voulue. L'objet fictif possède une "masse infinie" et les articulations sont passives.

Les solutions pour engendrer la trajectoire d'un objet attiré par sa représentation virtuelle vers son but, sont multiples. Elles dépendent des paramètres associés aux relations LS reliant les objets physiques aux objets fictifs. Il faut au moins quatre relations non-coplanaires liant l'objet physique à l'objet fictif. L'objet fictif doit avoir une "masse infinie", pour que l'objet physique ne subisse de façon certaine que les forces engendrées par les relations. La longueur de stabilisation p_0 de chaque relation LS doit être nulle. Les paramètres λ et μ de chaque relation dépendent de chaque objet à mouvoir. μ doit être assez grand, pour empêcher les oscillations près du but, et λ doit avoir une valeur lui permettant de rendre la relation assez rigide pour attirer l'objet (ou la main), et assez élastique pour ne pas "casser" les relations formant l'objet. Cette méthode peut être assimilée à une méthode à champs de potentiels [14]. Elle subit les mêmes problèmes dès qu'il y a des obstacles. On n'est pas sûr de trouver une trajectoire en présence d'obstacles, sauf si l'objet peut effectivement glisser sur les dits obstacles. Ce glissement est facilement réalisable en ne considérant que les forces de glissement dans l'application de la force de friction quand l'objet entre en contact avec un obstacle. Dès que la longueur courante de chaque relation LS ajoutée est nulle, le but est atteint.

4.3 La stabilité d'une prise

Nous venons de définir dans le paragraphe précédent, une série de stratégies de mouvement d'un objet physique. Supposons que la main articulée ait subi ce type de stratégie. La main a été attirée jusqu'à l'objet sous l'influence de ces doigts virtuels. Les doigts sont maintenant au contact de l'objet ou près du contact. Il faut s'assurer maintenant de la stabilité de l'ensemble main/objet.

4.3.1 Stabilité palmaire

La stabilité est une notion qui dépend du type de contact réalisé entre l'objet et la main. Le but est d'obtenir que la somme des forces exercées sur l'objet, et la somme des moments associés, sont ou tendent vers zéro pendant la phase de stabilisation. Ces forces exercées sur l'objet proviennent, soit du contact entre les doigts et l'objet, soit des caractéristiques physiques de l'objet, notamment la force de gravité. Pour le cas d'une saisie palmaire, l'objet est coincé dans la main et les contacts entre l'objet et la main sont multiples. Pour s'assurer de la stabilité, il suffit de s'assurer que les forces de friction, résultant des interactions, sont plus importantes que la force de gravité de l'objet :

$$|\vec{F}_f| > m|\vec{g}|$$

où $\vec{F}_f$ est la force résultante de friction appliqué sur O , m la masse de O , et $\vec{g}$ la force de gravité. Le problème est un peu plus complexe quand les bouts des doigts sont concernés.

4.3.2 Stabilité du bout des doigts

On peut assurer la stabilité du centre d'inertie de l'objet à saisir en ajoutant des liaisons physiques entre les particules de la main qui sont en contact avec l'objet. Ceci n'est valide que si la vitesse initiale de l'objet est nulle. En effet, l'objet est dans une position statique sur son support, donc la stabilisation de l'ensemble H/O ne dépend que des efforts appliqués par les doigts de la main. Prenons l'exemple de trois particules, assimilées à des bouts de doigts en contact avec l'objet. Si on relie toutes les particules deux à deux par une relation LS , on s'assure que la somme des forces extérieures reste nulle à chaque instant, suivant le principe de l'action/réaction. En effet, chaque relation engendre deux forces opposées et égales, définissant les forces de raideur qui apparaissent à chaque extrémité des relations LS . La figure 4.4 illustre un tel exemple pour trois points de contact : on lie chaque paire de points par une relation de type LS , et on applique les forces résultantes de ces relations à la main réelle. L'ensemble des relations LS assure que la somme des forces externes est nulle à chaque instant, sous la condition sous-jacente de non glissement. Cette condition de non glissement assure que l'objet restera à la même position. Elle n'est réalisée que si les forces associées aux relations LS vérifient l'inégalité suivante :

$$|\vec{F}_{ext}| < |\vec{F}_f|$$

où $\vec{F}_f$ est la force de friction statique entre l'objet et son support. Cet exemple nous permet d'envisager la possibilité du contrôle des forces de contact, par l'utilisation de la "planification physique".

Pour obtenir la stabilité de l'ensemble main/objet il faut aussi s'assurer que la somme des moments est nulle - (§ 2.1.2). L'ensemble des relations LS rajoutées entre les particules de la main en contact, ne fait que garantir que la résultante des forces soit nulle. En effet, l'objet peut tourner sous l'effet des moments. Comme le centre d'inertie ne bouge pas sous l'effet des forces ($\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$), les moments n'engendrent qu'une

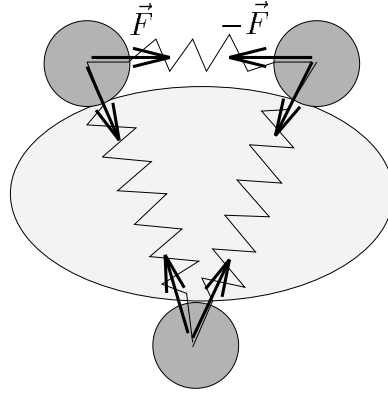


FIG. 4.4 - : Relations de type LS entre les points de contact pour garantir que la somme des forces extérieures soit nulle.

rotation autour du centre d'inertie. L'équilibre ne sera réalisé que quand la somme des moments sera nulle, ou que les doigts ne pourront plus bouger, du fait des contraintes cinématiques (figure 4.5).

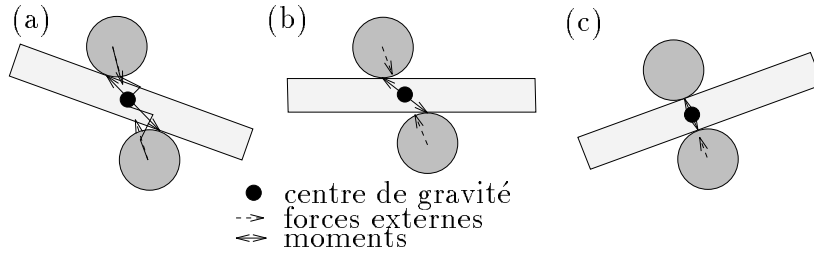


FIG. 4.5 - : En assurant que la somme des forces extérieures est nulle à chaque instant, le centre d'inertie de l'objet ne bouge pas. L'objet ne peut que tourner autour de son centre d'inertie jusqu'à une position d'équilibre.

Dans un cas réel de saisie, les doigts de la main n'arrivent jamais en même temps sur l'objet. Dans ce cas précis, on ne peut pas assurer que la somme des forces soit nulle. Une solution consiste à approcher les doigts avec une force plus petite que la force de frottement statique entre l'objet et son support (§ 3.2.4.2): $|\sum \vec{F}_{ext}| < |\vec{F}_f|$ où $\vec{F}_f$ représente la force de friction entre l'objet et son support. De cette façon, on s'assure que l'objet ne bougera que lorsque tous les contacts auront été établis. A ce moment, et seulement à ce moment, on peut augmenter les forces de contact pour saisir l'objet.

4.3.3 Contacts non prévus

Une propriété intéressante des modèles physiques, quand l'objet bouge et entre en contact avec une partie de la main qui n'a pas été prévue par le planificateur de

pré-configuration, est son habileté à prendre “implicitement” en compte les nouvelles interactions dans le processus de stabilisation. Par exemple, le contact souhaité est “bout des doigts”, et à un moment donné, le contact établi est un contact palmaire sur un doigt. Dans un tel cas, pour converger vers la stabilité, il faut alors rajouter des relations entre les particules en contact. C’est un aspect pratique des modèles physiques, car on travaille au niveau des particules, et pas au niveau de l’objet lui-même. Il est facile à chaque instant de connaître les particules en contact. On peut donc “réagir” en rajoutant des liaisons permettant d’assurer des forces externes nulles.

4.4 Modélisation des contraintes du planificateur de pré-configuration

Nous avons vu au paragraphe 1.2.1 que les caractéristiques issues de la planification classique, et notamment l’utilisation des informations de la pré-configuration, peuvent servir d’initialisation à la saisie par modèle physique. Nous allons donner dans ce paragraphe les éléments permettant de faire le lien entre le planificateur de pré-configuration, et le planificateur physique, en utilisant les notions de mouvement et de stabilité énoncées aux paragraphes précédents.

Pour une prise suggérée par le planificateur de pré-configuration, les paramètres les plus importants issus de son analyse, sont décrits dans le tableau 4.1. Notamment, sont décrits la forme de l’objet à saisir fo , le nombre de doigts nd utilisés, le type de contact espéré tc , le type de prise tp , et la stratégie de fermeture sf dépendante de tc et tp .

<i>Description</i>	<i>Attributs</i>
La forme de l’objet à saisir fo	épaisseur Ep , largeur La , longueur Lo
Le nombre de doigts nd	deux doigts D_2 ou trois D_3 (Pouce, Index, Majeur = Po, In, Ma)
Le type de contact tc	bout tip , pulpaire pad ou palmaire $palm$
Le type de prise tp	sphérique Sp cylindrique Cy , ...
Stratégies de fermeture sf	$SF_{tc/tp}$

TAB. 4.1 - : Liste des informations importantes issues de la pré-configuration.

Chaque attribut a une influence, soit sur une éventuelle “relation” entre un doigt et un autre, soit sur la valeur d’équilibre de cette relation. Le terme relation, ici, décrit l’opposition des doigts entre eux, une fois la pré-configuration effectuée. Typiquement, pour une prise sphérique, le pouce, l’index et le majeur sont en opposition deux par deux. Pour une prise cylindrique, le pouce est en opposition au couple {index, pouce}. Nous allons nous servir de cette opposition “naturelle” pour rajouter des liaisons de type LS entre chaque doigt, et sur l’objet, pour “espérer” obtenir une prise compatible avec la pré-configuration obtenue et “espérer” converger vers une prise stable. Pour

cela, il faut attirer chaque doigt vers l'objet en gardant l'opposition naturelle décrite par le *type de prise* et obtenir le contact décrit par *le type de prise*. De plus, il faut ensuite s'assurer de la stabilité. Deux étapes distinctes décrivent la planification de saisie :

- *Etape₁(E₁)* : les doigts sont attirés vers l'objet jusqu'au contact, en utilisant la notion de mouvement, décrite au paragraphe 4.2. Le type de contact à réaliser détermine les particules des doigts à connecter à des particules fictives près de l'objet, en utilisant des relations *LS* appropriées. Les particules fictives placées près de l'objet sont déterminées par la stratégie de fermeture associée au type de contact et au type de prise. Elle permet de connaître la position approximative des doigts autour de l'objet. Cette étape permet de rapprocher la main près de l'objet jusqu'au contact. Les relations rajoutées entre l'objet et la main contraignent la configuration finale des doigts autour de l'objet.
- *Etape₂(E₂)* : Les doigts sont au contact de l'objet et bougent de manière compliant, pour obtenir l'équilibre du système main/objet. Ce comportement est obtenu en connectant les particules des doigts entre elles, en utilisant les relations *LS*. Le choix des particules à connecter dépend du type de contact. Les caractéristiques des relations dépendent du type de prise à obtenir.

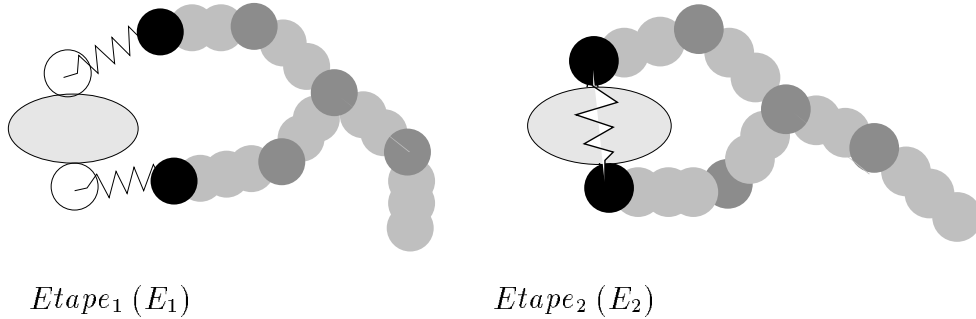


FIG. 4.6 - : Les étapes de la stabilité: (E_1) la main s'approche au contact de l'objet, (E_2) compliance de l'ensemble main/objet.

La figure 4.6 illustre les deux étapes de la planification. Il est à noter que le résultat de ces deux étapes ne converge pas obligatoirement vers une prise stable. Il se peut que la prise à engendrer ne convienne pas, dans le sens où, soit le type de prise ne convient pas, soit le type de contact n'est pas adapté, soit la configuration initiale est mauvaise, soit enfin il n'y a tout simplement pas de prise stable. La figure 4.9 montre un tel échec.

Le but initial du planificateur physique est la simulation de la saisie sous certaines contraintes. Il nous sert à rejeter des prises non valides (i.e qui ne convergent pas vers la stabilité). Dans une étape ultérieure, on envisage avec le planificateur physique, un contrôle de l'exécution de la saisie, c'est-à-dire des solutions réactives à un comportement non conforme (i.e. non stable).

Le paragraphe ci-après décrit les influences de chaque attribut sur les liaisons connectant les doigts et l'objet, pour “espérer” obtenir une prise préconisée par le planificateur de pré-configuration. Une sphère et un cylindre servent d'exemple.

4.4.0.1 Exemple sur une sphère et un cylindre

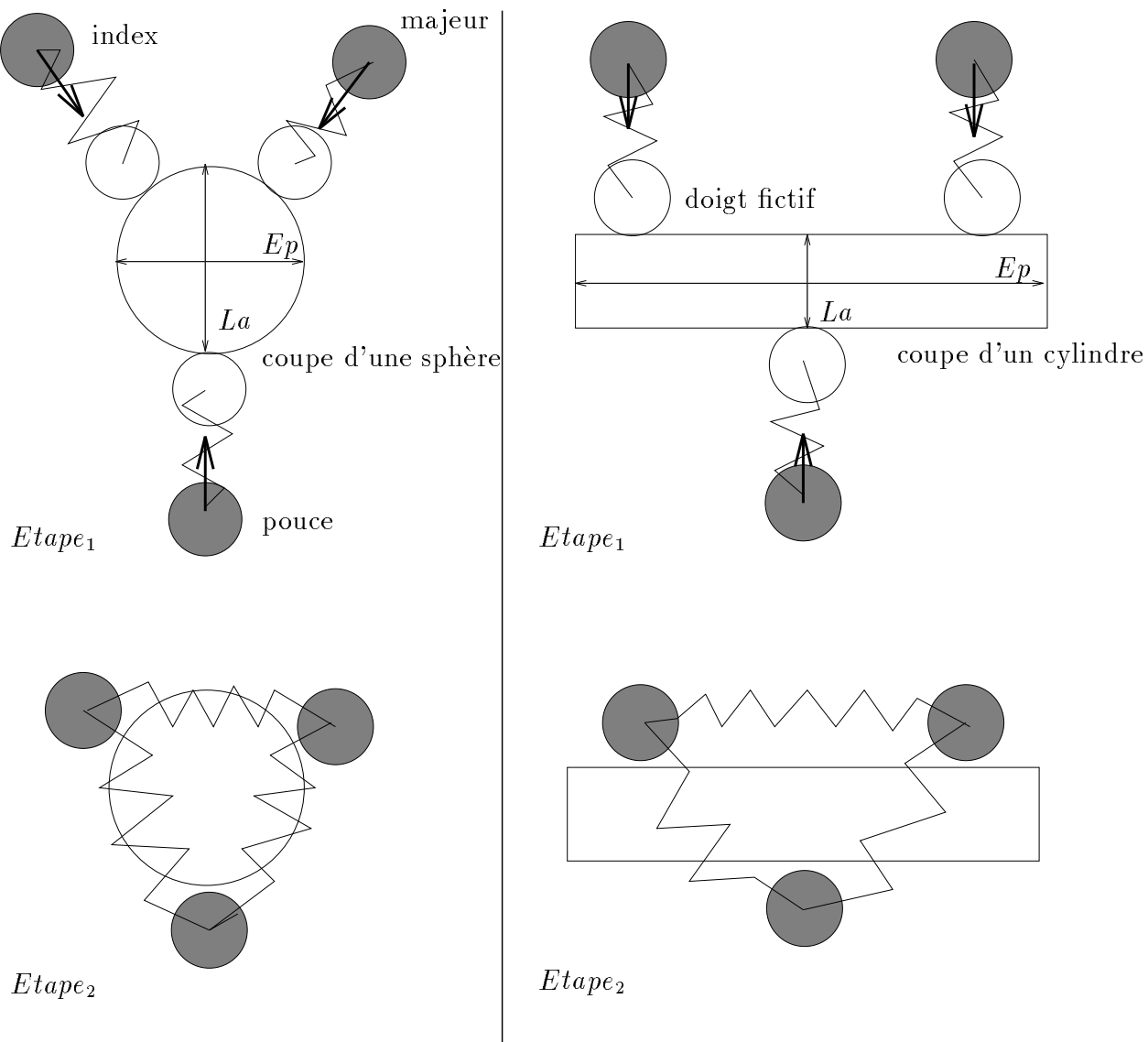


FIG. 4.7 - : Description des étapes de liaisons sur une sphère et un cylindre, pour des saisies sphérique et cylindrique du bout des doigts.

Soient un objet et une main à trois doigts, le tout modélisé sous “forme physique”. Supposons que les doigts se sont pré-configurés autour de l'objet à saisir (la position/orientation est déjà définie) avec le planificateur de pré-configuration. Il ne reste plus qu'à refermer les doigts sur l'objet, en tenant compte des contraintes de stabilité

et de pré-configuration. La pré-configuration nous donne un certain nombre d'informations, qui vont permettre de "configurer" les relations (de type LS) entre le modèle physique de la main et le modèle physique de l'objet. Il s'agit de converger vers la prise voulue, c'est-à-dire définir les relations LS et leurs paramètres. On associe à chaque type d'attribut de pré-configuration, un ou plusieurs attributs physiques. La figure 4.7 montre un exemple d'une telle association, pour un contact du bout des doigts :

- Le nombre de doigts D_2 ou D_3 détermine sur quels doigts les liaisons de type LS vont être ajoutées.
- Les relations de type LS relient les doigts aux doigts fictifs pour l'étape E_1 . Elles dirigent les doigts suivant la stratégie de fermeture envisagée, qui elle-même dépend du type de prise et de contact. Le paramètre p_0 de ces relations est toujours égal à zéro. Pour la sphère, la fermeture des doigts se dirige vers le centre de celle-ci, tandis que pour le cylindre, le pouce s'oppose aux autres doigts.
- La taille de l'objet détermine les valeurs de stabilisation de chaque relation LS dans l'étape E_2 . p_0 dépend du type de prise, et correspond à une combinaison de Ep, La, Lo . Pour une prise cylindrique Cy , la valeur initiale est $p_o = La$ pour les liaisons LS entre les couples $\{Po, In\}$ et $\{Po, Ma\}$, et de $p_o = Ep$ pour la relation LS reliant le couple $\{In, Ma\}$. Cela permet de garder l'opposition entre la pouce et les deux autres doigts. Pour une prise sphérique Sp , la valeur initiale est constante : $p_o = \frac{Ep}{4}\sqrt{10}$ ($Ep \equiv La \equiv Lo$, les angles du triangle reliant les trois bout de doigts $\equiv 120^\circ$).

Ces contraintes garantissent que la saisie obtenue est conforme à la prise et à la tâche souhaitées. La figure 4.8 illustre la dépendance entre le type de contact et les positions des relations LS .

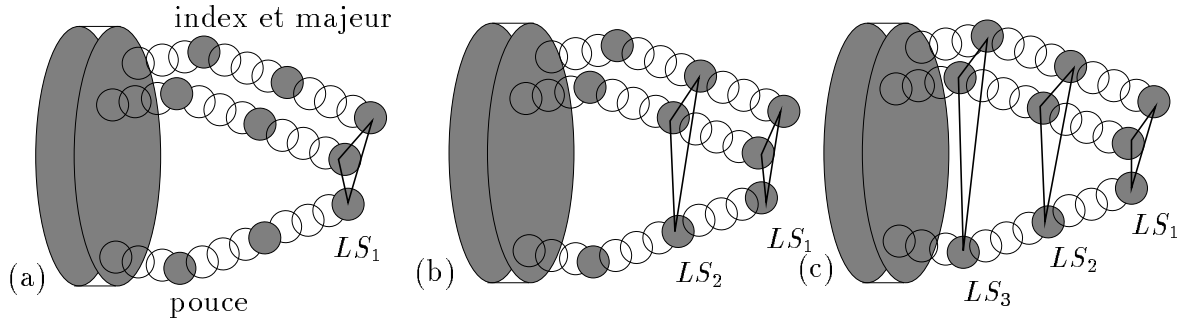


FIG. 4.8 - : Les relations LS dépendent du type de contact souhaité: (a) contact Bt , (b) contact Pu , (c) contact Pa . Chaque LS_i correspond en fait à trois LS .

4.4.0.2 Expérimentation

La connexion actuelle entre le planificateur de pré-configuration et le planificateur de saisie se fait en simulation et au moyen d'un fichier décrivant la position des doigts,

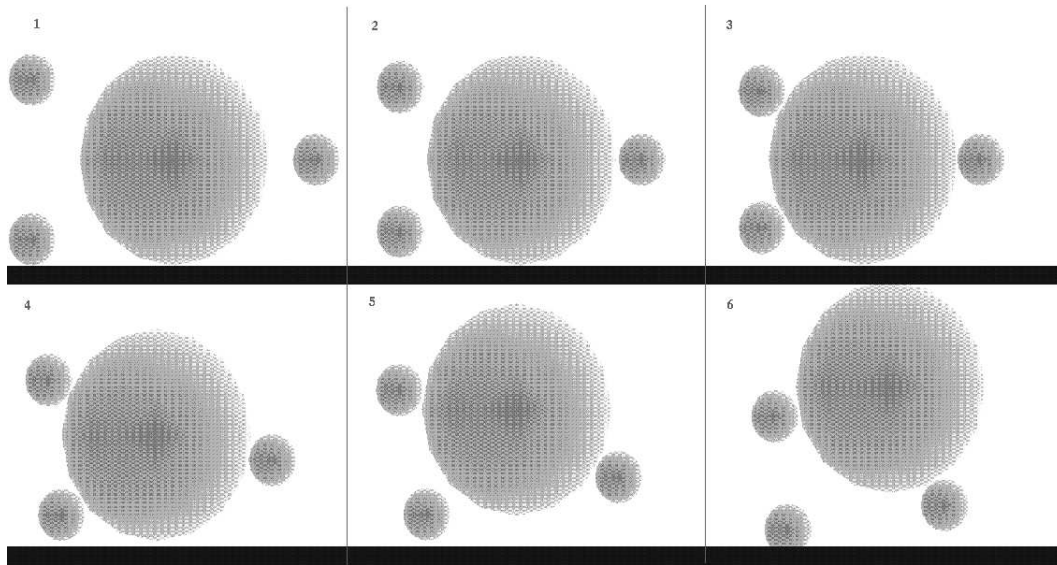


FIG. 4.9 - : Simulation de la saisie par le bout des doigts d'une sphère, posée sur une table, subissant la force de gravité. La sphère, après quelques instants, subit le contact des doigts et glisse.

les efforts à appliquer et les liaisons de type LS entre les doigts. La figure 4.9 montre un tel exemple, où les bouts de doigts (représentés par les petites sphères) veulent effectuer une saisie sphérique sur une sphère posée sur le sol et sujette à la gravité. La scène #1 montre la position initiale des doigts. Dans la scène #2, le pouce entre en contact avec la sphère qui est alors poussée vers les deux autres doigts. Les deux autres doigts sont ensuite en contact avec la sphère, qui est repoussée vers le pouce (scène #3). A partir de cet instant (scènes #4 à #6), la sphère glisse entre les doigts, et va retomber sur le sol. Pour empêcher ce glissement, plusieurs solutions sont possibles. Soit on peut augmenter la force de friction sur chaque doigt, pour qu'elle devienne plus importante que la force de liaison entre deux doigts, soit on peut changer les positions relatives des doigts à l'initialisation. En effet, dans le cas présenté, elles ne correspondaient pas à une pré-configuration sphérique.

Chapitre 5

Conclusion

Travail réalisé. Nous avons présenté dans ce rapport une méthode pour prendre en compte les interactions physiques entre une main articulée et des objets. Cette méthode est basée sur la formulation de contraintes physiques appliquées à une main robotique et à des objets pendant la phase de saisie. Nous avons aussi montré comment un planificateur géométrique, basé sur la notion de pré-configuration, pouvait être connecté à un planificateur physique, pour permettre de prendre en compte toutes les contraintes. En effet, des relations entre les doigts ont été ajoutées, pour prendre en compte les problèmes de stabilité et de forces engendrées par les doigts au moment de la fermeture sur l'objet. De plus, ces relations ont permis d'orienter, en donnant au planificateur physique des contraintes supplémentaires telles que le type de contact, le type de prise et la partie d'objet à saisir par le pré-positionnement des doigts autour de l'objet. Cette connexion n'existe à l'heure actuelle qu'en simulation. Nos travaux actuels s'orientent vers la réalisation de cette connexion sur une vraie main articulée, disponible au laboratoire (figure 1.1).

Outre cette connexion permettant une approche globale dans la résolution d'une opération de saisie, une propriété significative de notre système, est son habileté à prendre en compte des contacts palmaires et pulpaire, sans augmenter sa complexité. De plus, il permet de connaître à chaque instant la position des objets, ce qui est pratique, si au cours d'une exécution, le comportement du système main/objet n'est pas celui escompté au départ (i.e. si l'objet s'échappe de la main).

Néanmoins, le problème essentiel de ce genre de méthode est le besoin d'identification des paramètres du modèle. En effet, nous avons proposé un modèle mécanique qui nous permette de simuler les propriétés mécaniques d'un objet donné. L'ajustement des paramètres tels que la viscosité ou la rigidité, est important pour que le comportement simulé reflète le comportement réel de l'objet de référence. Pour l'instant, cet ajustement est effectué à la main.

Extensions futures. Nos travaux futurs dans le domaine concernent la mise en application des différents concepts pour la saisie, et cela sur une vraie main. On envisage

avec les modèles physiques d'autres applications dans la continuité du travail actuel. Ils concernent les points suivants :

- En appliquant les notions de mouvement d'objet décrites au chapitre 4, on peut envisager, non pas de saisir un objet, mais de le pousser. Cette opération peut nous servir en cas de non accessibilité de l'objet. Elle nous permet de connaître les efforts à appliquer sur l'objet pour l'amener dans une position voulue. On considère alors que ces efforts sont exercés par un doigt sur l'objet.
- Le fait de connaître la position des objets à chaque instant, nous permet d'envisager des techniques permettant la saisie d'objets mobiles. Un objet mobile n'est ni plus ni moins, un objet soumis à une force externe. On peut envisager le suivi de cet objet en rajoutant des buts à atteindre sur l'objet, qui varient avec le mouvement de l'objet.
- L'identification des paramètres est un problème entier, qui reste à résoudre. Dès que l'objet à saisir change, les paramètres du modèle change. Nos extensions futures visent à considérer la saisie d'objets complexes, comme l'union d'objets canoniques dont les paramètres ont déjà été identifiés. La saisie se prête bien à ce genre de décompositions. En effet, quand un objet a des protubérances marquées, ce sont celles-ci qui "reçoivent" les doigts.

Remerciements

Ce travail est partiellement financé par le projet Esprit BRA-6769 SECOND (première année) et par le Centre National d'Études Spatiales (pour Christian Bard). Merci à la "Région Rhône-Alpes" qui a permis à l'équipe d'acquérir la main de Salisbury. Les auteurs remercient Christian Laugier qui a proposé et suivi notre travail, dont le premier aboutissement est ce rapport de recherche. Enfin les auteurs remercient Emmanuel Mazer et Jocelyne Troccaz pour leur remarques et commentaires judicieux.

Bibliographie

- [1] Alonso and Finn. *Physique générale, mécanique et thermodynamique*. InterEdition, 1986.
- [2] C. Bard, C. Bellier, J.Troccaz, C. Laugier, B. Triggs, and G. Vercelli. Achieving dextrous grasping by integrating planning and vision based sensing. In *International Journal of Robotics Research*, 1994. To appear in 1994.
- [3] Ch. Bard and J. Troccaz. Automatique preshaping for a dextrous hand from a simple description of objects. *IEEE International workshop on Intelligent Robots and Systems*, July 1990.
- [4] Ch. Bard and J. Troccaz. Grasp planning in spatial environment. In Cepadues Editions, editor, *Artificial Intelligence, Robotics and Automation, in Space*. National Center of Space Studies (CNES), September 1992.
- [5] J.M. Dorlot, J.P. Ballon, and J. Masounave. *Des matériaux*. Editon de l'école polytechnique de Monreal, 1986.
- [6] R.S. Fearing. Implementing a force strategy for objects re-orientation. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, April 1986.
- [7] M.P. Gascuel, A. Verroust, and C. Puech. A modelling system for complex deformable bodies suited to animation and collision processing. *Visualisation and computer animation*, 1991.
- [8] D. Gay and J. Gambelin. *Une approche simple du calcul des structures par la méthode des éléments finis*. Hermès, 1989.
- [9] H. Hanafusa and H. Asada. Stable prehension by a robot hand with elastic fingers. In *7th Int. Symp. on Industrial Robots*, Tokyo, October 1977. also published in *Robot Motion: Planning and Control*, edited by Brady and al., MIT Press, 1982.
- [10] M. Jeannerod. *Attention and Performance*, chapter Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects, pages 153–168. Erlbaum, Hillsdale, 1981.
- [11] S. Jimenez. Modélisation et simulation d'objets volumiques déformables complexes. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juin 1989. In french.

- [12] S. Jimenez and A. Luciani. Une vue unifiée de comportement de multitude, flexibilité, plasticité et rupture -billes, bulles et agglomérations. Technical report, RR LIFIA N 104 ,RR ACROE N 89-15), Novembre 1989. in french.
- [13] S. Jimenez and A. Luciani. Animation of interacting objects with collision and prolonged contacts. *Modeling in computer graphic*, 1993.
- [14] O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 5(1):90–98, Spring 1986.
- [15] Ch. Laugier, S. Jimenez, and A. Luciani. Teleprogramming the motion of a planetary robot using physical models and dynamic simulation tools. *IEEE International workshop on intelligent robots and systems*, July 1990.
- [16] Ch. Laugier, S. Jimenez, and A. Luciani. Physical modeling as an help for planning the motion of a land vehicle. *IEEE/RSJ International workshop on intelligent robots and systems*, November 1991.
- [17] A. Luciani, S. Jimenez, J.L. Florens, O. Raoult, and C. Cadoz. Modèles comportementaux vers une approche instrumentale de la synthèse d’image. *Rapport de recherche ACROE/INPG*, Decembre 1989. In french.
- [18] M.T. Mason. *Manipulator grasping and pushing operations*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 1982. also published as a technical report of the AI Lab., AI-TR-690.
- [19] M.T. Mason and J.K. Salisbury. *Robot hands and the mechanics of manipulation*. Artificial Intelligence. MIT Press, 1985.
- [20] J. Max. *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*. Masson, 1989.
- [21] V.D. Nguyen. Constructing force-closure grasps in 3d. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh, April 1987.
- [22] K. Nilfried, J.P. Mercier, and G. Zambelli. Traité des matériaux : introduction à la science des matériaux. *Presses polytechniques et universitaires, Romandes*, 1991.
- [23] J. Pertin-Troccaz. *Modélisation du raisonnement géométrique pour la programmation des robots*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Mars 1986. In french.
- [24] N.S. Pollard. The grasping problem toward task-level programming for an articulated hand. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technologie, March 1989.
- [25] J. Ponce and B. Faverjon. On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects. Technical Report UIUC-BI-AI-RCV-93-05, The Beckman Institute, University of Illinois, April 1993.
- [26] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer. Elastically deformables models. *Computer Graphics, volume 21, Number 4*, July 1987.



Unité de recherche INRIA Lorraine, Technopôle de Nancy-Brabois, Campus scientifique,
615 rue du Jardin Botanique, BP 101, 54600 VILLERS LÈS NANCY
Unité de recherche INRIA Rennes, Irisa, Campus universitaire de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex
Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes, 46 avenue Félix Viallet, 38031 GRENOBLE Cedex 1
Unité de recherche INRIA Rocquencourt, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex
Unité de recherche INRIA Sophia-Antipolis, 2004 route des Lucioles, BP 93, 06902 SOPHIA-ANTIPOLIS Cedex

Éditeur

INRIA, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex (France)

ISSN 0249-6399