

PROTOTYPAGE VIRTUEL DE MICRO-ENDOSCOPES PAR ALGORITHMES ÉVOLUTIONNAIRES

Frédéric Chapelle*, Georges Dumont†, Olivier Chocron‡

*Laboratoire de Robotique de Paris †ENS Cachan, Antenne de Bretagne ‡Dept. of Mechanical Engineering
10,12 Avenue de l'Europe Campus de Ker lann Mass. Institute of Technology
78140 Vélizy-Villacoublay 35170 Bruz Cambridge, MA 02139 USA

chapelle@robot.uvsq.fr,
dumont@bretagne.ens-cachan.fr,
chocron@mit.edu

Résumé - Dans cet article, nous définissons une méthode de conception et d'optimisation de micro-endoscopes actifs. La méthode que nous employons se découpe ainsi: nous utilisons tout d'abord un Algorithme Génétique (AG) qui propose, sélectionne et modifie les endoscopes candidats qui sont gérés par le processus. Cet algorithme permet d'explorer et de mettre en exergue les régions intéressantes dans l'espace discret des solutions possibles. En second lieu, nous utilisons une procédure d'évaluation des candidats qui permet de diriger les choix de l'algorithme génétique. Cette évaluation est issue de la simulation du micro-endoscope dans la réalisation d'une tâche spécifique au sein de l'environnement modélisé. Cette simulation est réalisée à partir d'une plate-forme possédant une structure modulaire et multi-couche. Cette dernière permet une implémentation aisée de nouveaux modules relatifs à notre projet, dont un comprend le modèle mécanique de l'endoscope, un autre la commande et un dernier l'optimisation.

Mots clé - Prototypage virtuel, Micro-endoscopes, Simulation multi-physique, Optimisation, Algorithmes Évolutionnaires.

1 Introduction

La recherche en robotique a de nombreuses potentialités dans le domaine médical ([3], [6], [13]). Les chirurgiens sont notamment à la recherche de techniques toujours moins invasives pour le corps du patient, ainsi que d'aide au geste opératoire. Il est donc important d'avoir des systèmes de conception performants propres à ce domaine.

Notre article détaille une méthode de conception pour un système de micro-endoscopie. Elle est basée sur des techniques de prototypage virtuel, utilisant la puissance des ordinateurs tant au niveau graphique que de la simulation de systèmes mécaniques complexes ([9], [10]). La conception et l'optimisation sont basées sur l'utilisation d'une branche de la famille des Algorithmes Évolutionnaires: les Algorithmes Génétiques (AG). Ces derniers sont des méthodes numériques s'inspirant des principes de la théorie de l'Évolution Naturelle telle que définie par Darwin. Ils proposent, sélectionnent et modifient des micro-endoscopes virtuels candidats. L'évaluation de chacun est réalisée par l'utilisation de notre simulateur (GASP). Il est développé en C++ et peut être exécuté sur différentes configurations matérielles.

Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord la structure de notre micro-endoscope, puis nous décrivons les principes des Algorithmes Génétiques, montrons les particularités de notre simulateur. Pour finir, nous proposons les premiers résultats de nos travaux.

2 Présentation du système de micro-endoscopie



Figure 1: Photo de la gaine externe

La construction des micro-endoscopes est réalisée au sein du groupement de laboratoires MESI (Micro-Equipements : Systèmes et Interfaces) comprenant en autres le LRP, l'IRISA, l'ENS Cachan. Ils doivent être flexibles, et s'adapter à la courbure de l'environnement. Ils se présentent sous la forme d'un assemblage de modules de longueurs différentes et reliés entre eux par des liaisons pivots possédant deux orientations possibles (figures 1, 2 et 3). Ils sont conçus de telle sorte qu'on puisse y loger un réseau optique et électrique ([15]). Les modules peuvent être commandés individuellement. Un actionneur à base d'un Alliage à Mémoire de Forme et un contrôleur de

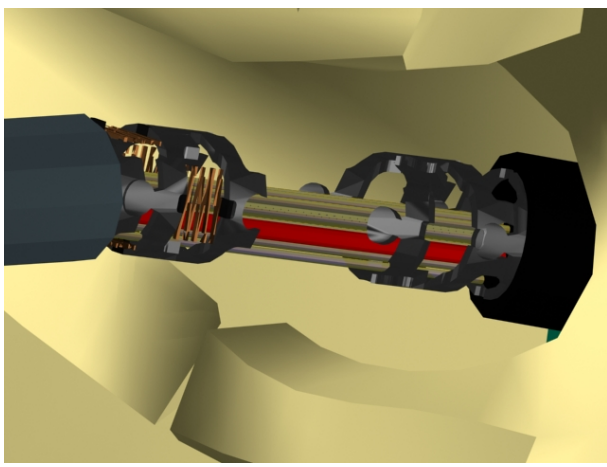


Figure 2: Représentation de l'endoscope

position et d'effort, sont intégrés dans chaque module. Différentes stratégies de commande doivent être mises en oeuvre :

- orientation par l'opérateur en fonction de la vision ;
- commande par rétropropagation de la courbure ;
- contrôle de telle manière que les efforts d'interaction entre les modules d'un endoscope et l'environnement soient minimisés (approche multi-agents ou non), [7].

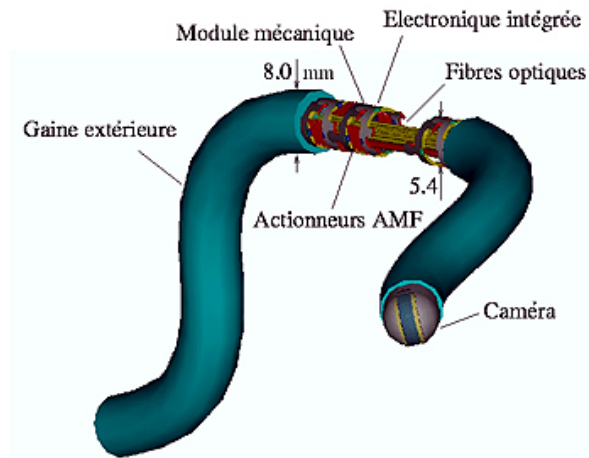


Figure 3: Description de l'endoscope

Étant donné que les méthodes déterministes ne peuvent s'appliquer (les micro-endoscopes présentent une structure modulaire et les problèmes mis en jeu ne sont pas linéaires), l'optimisation est réalisée au moyen de techniques utilisant la famille des Algorithmes Évolutionnaires ([5]).

3 Les Algorithmes Évolutionnaires

Les Algorithmes Évolutionnaires (AE) sont des algorithmes numériques semi-stochastiques qui simulent l'évolution d'une population ([2]). L'optimisation ne s'effectue donc pas sur une solution unique mais sur un ensemble de solutions. Les individus de cette population sont les micro-endoscopes virtuels candidats du processus d'optimisation. Ils sont codés par des génotypes (composés de chromosomes constitués de gènes) et soumis à chaque génération à différents opérateurs inspirés des principes de l'Évolution Naturelle (survie du plus fort). Les deux principaux avantages de ces algorithmes sont qu'ils peuvent travailler avec n'importe quel type de problèmes (pas de nécessité de formalisation) et que la recherche s'effectue de manière réellement globale.

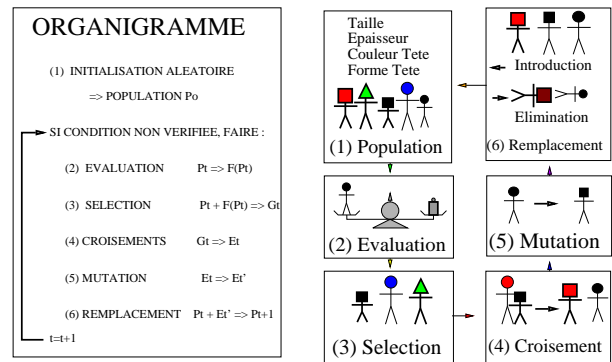


Figure 4: Algorithme Évolutionnaire

Comme présenté à la figure 4, un AE typique est constitué par :

- le codage du génotype (1) ;
- le processus d'évaluation (2) ;
- les opérateurs génétiques (3,4,5,6).

Le codage du génotype est une structure de données qui inclut tout ce sur quoi nous voulons agir durant le processus d'optimisation (les paramètres de design). Une population initiale est d'abord générée aléatoirement (1). A chaque génération, on applique en premier les techniques d'évaluation (2) qui associent à chaque individu de la population actuelle une valeur appelée "fitness", et qui permet de mesurer sa qualité par rapport au résultat souhaité et à son environnement. La sélection (3) permet d'isoler un groupe de bons individus qui seront utilisés comme parents pour constituer la prochaine génération. Ensuite les opérateurs "croisement" (4)(deux parents peuvent échanger ou non une partie de leurs chromosomes) et "mutation" (5)(changement aléatoire de la valeur des gènes) sont appliqués aux parents pour générer les individus enfants. A la fin de la génération ces derniers remplacent leurs parents et ainsi donnent naissance à une

nouvelle population. Ce cycle est répété jusqu'à ce que le temps d'évolution (le nombre de générations maximal) soit écoulé ou que l'on obtienne des fitness acceptables. La sélection et le croisement concentrent la population sur des valeurs élevées de la fitness. La mutation permet d'éviter le piège de la convergence vers un maximum local (et non global) en conservant une bonne richesse génétique. Ainsi, au fil des générations la population évolue vers les meilleures solutions.

Un certain nombre de variables et de méthodes doivent ainsi être définies pour la conception d'un algorithme génétique :

- une représentation génétique des individus (codage) ;
- la taille ainsi que l'initialisation aléatoire de la population ;
- une fonction d'évaluation ou "fitness" ;
- le pourcentage de croisement ;
- le pourcentage de mutation.

Nous devons alors trouver le bon "dosage" pour ces différents paramètres afin de favoriser l'apparition de phénomènes souhaitables et de minimiser les autres :

Les phénomènes désirables

1. convergence partielle ;
2. découverte de nouvelles solutions ;
3. mémoire des régions intéressantes.

Les phénomènes indésirables

1. convergence prématurée ;
2. égarement de la recherche ;
3. disparition des bonnes solutions.

Les phénomènes à doser

1. convergence ;
2. exploration ;
3. exploitation.

Par rapport aux méthodes déterministes, nous pouvons résumer les avantages et inconvénients des AE de la façon suivante :

Avantages

1. codage des paramètres (déplacement des minima locaux) ;
2. travail sur une population (parallélisme) ;
3. utilisation d'un modèle "boîte noire" (pas d'informations auxiliaires) ;

4. prise en compte de règles stochastiques (permet d'explorer l'espace).

Inconvénients

1. travail d'adaptation du problème (codage) ;
2. optimum global non garanti (suboptimal) ;
3. réglage des paramètres (opérateurs) ;
4. temps de calcul en ligne important.

Nous utilisons une branche particulière de la famille des Algorithmes Évolutionnaires : les Algorithmes Génétiques (AG), développée initialement par John Holland ([12]) dans les années 60. Ils se caractérisent par un codage des individus sous forme de chaîne(s) de bits ou de réels ([11], [14]). Dans le cas qui nous intéresse, le codage se fait par l'intermédiaire d'une chaîne de $N \times 4$ bits, N étant le nombre maximum de modules des endoscopes. Pour chaque module, deux bits sont utilisés pour coder la longueur, un pour l'axe de liaison avec le précédent, un pour coder la présence ou non du module.

L'évaluation de chaque micro-endoscope est réalisée par l'utilisation de notre simulateur GASP (General Animation and Simulation Platform) développé par l'IRISA avec la participation du Laboratoire de Robotique de Paris. Ce simulateur possède une structure modulaire avec un noyau qui gère la synchronisation et les échanges entre chaque module. Nous décrivons dans la section suivante les différents aspects particuliers à cette plate-forme.

4 La plate-forme de simulation

4.1 Description générale

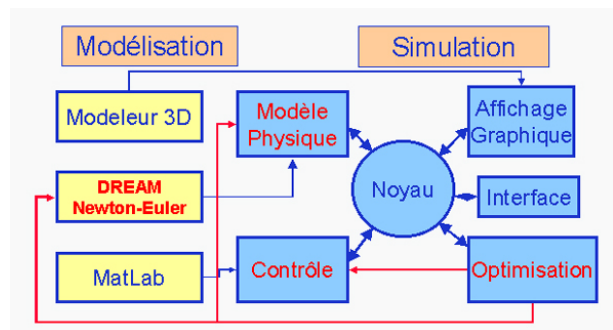


Figure 5: Organisation de la plate-forme

Elle s'intègre dans le projet SIAMES de l'IRISA. Le principal objectif de GASP ([1], [4], [8]) est de proposer une simulation modulaire pouvant être exécutée sur différentes configurations matérielles. La plate-forme gère la synchronisation et les échanges de données entre les processus coopérants même si les fréquences de calcul de ces modules sont différentes. Elle

est développée en utilisant les spécificités de la programmation orientée objet. L'organisation de la plate-forme est décrite sur la figure 5.

4.2 Modèle mécanique

Un modèle mécanique et dynamique de micro-endoscope a été défini pour la plate-forme. Il est constitué, comme le prototype physique que nous réalisons par ailleurs, de segments articulés connectés par des liaisons. Le modèle de ces liaisons a été conçu pour reproduire la géométrie et le comportement des micro-actionneurs. Deux choix s'offrent à nous pour réaliser la simulation :

- celui d'un algorithme de Newton-Euler récursif ;
- celui d'un algorithme basé sur les équations de Lagrange.

Les deux donnent des résultats similaires, néanmoins, au vu des structures que nous étudions (structures en chaîne ouverte), il semble que le premier soit mieux adapté à une intégration dans un processus d'optimisation car son exécution est plus rapide.

Pour que le processus d'optimisation puisse agir sur la simulation, nous avons défini les individus en utilisant un fichier de description générique d'endoscope qui contient :

- la description des segments, pour lesquels les propriétés inertielles sont calculées en fonction du type ;
- la description des liaisons ainsi que de leur positionnement relatif au segment père et au segment fils ;
- des valeurs d'initialisation.

Un exemple d'un tel fichier est présenté ci-dessous,

```
// endoscope a 3 solides
//Initialisation des objects
Groupe = monGroupe
NbSolides=3 NbJoints=3
//Pas de temps
Pas = 0.04
//gravite
Gravite = (0,0,-1)
//Methode d'integration
Methode = 0 \\
//Solides
Solides:
//Nom      type      longueur  diam  densite
Solide1    Cylindre    1         0.02  1
Solide2    Cylindre    1         0.02  1
Solide3    Cylindre    1         0.02  1
//Liaisons
Joints:
```

```
//Name Type Parent Child
//PosInParent PosInChild
Joint1 rotoid monGroupe Solide1
(0.0.0.0.0.0) (0.-0.5.0.0.0.0)
Joint2 rotoid Solide1 Solide2
(0.0.5.0.0.0.0) (0.-0.5.0.0.0.0)
Joint3 rotoid Solide2 Solide3
(0.0.5.0.0.0.0) (0.-0.5.0.0.0.0)
```

4.3 Commande du modèle

Nous avons développé un module définissant un contrôleur qui commande le modèle mécanique. Son objectif est de piloter l'orientation articulaire de l'endoscope pour permettre une introduction plus aisée dans les vaisseaux sanguins virtuels. Il est basé sur la description géométrique des liaisons entre deux segments adjacents ainsi que sur les caractéristiques géométriques et comportementales de l'actionneur en AMF. Ce modèle est couplé au module de simulation mécanique pour effectuer un contrôle en position.

4.4 Interactions

Nous avons complété notre simulateur par un module de détection et de traitement des interactions entre l'endoscope et le vaisseau. Le premier modèle de vaisseau est basé sur une description en objets élémentaires :

- des cylindres à base circulaire ;
- des secteurs angulaires de tores.

Pour un calcul d'intersection rapide, ces éléments sont représentés par leurs équations analytiques. L'algorithme de test est le suivant :

- test (discret) de chacun des segments constitutifs de l'endoscope : détection des parties qui traversent la paroi ;
- calcul, par une méthode de compliance, de la force de réaction qui assure le maintien de l'endoscope à l'intérieur du vaisseau.

Pour mieux prendre en compte cette interaction, nous devons développer un modèle de comportement de vaisseaux humains qui fera l'objet d'une collaboration avec des médecins.

4.5 Optimisation

L'implémentation d'un module d'optimisation pour contrôler la conception de l'endoscope par les résultats de la simulation dynamique a été faite. L'organisation est présentée sur la figure 6. Un module de plate-forme qui supervise l'ensemble a été défini : son objet est de créer des prototypes virtuels d'endoscope sous le formalisme décrit ci-dessus. Le premier paramètre d'optimisation que nous avons choisi est la longueur de chaque segment. Une fois que le superviseur générique

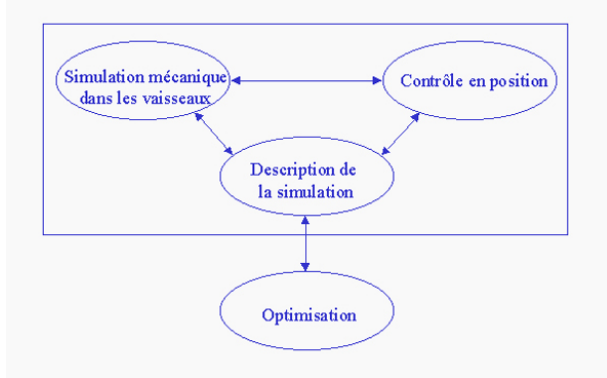


Figure 6: Organisation modulaire du processus d'optimisation

a défini l'endoscope virtuel, il déclenche la simulation constituée de deux modules synchronisés :

- le modèle mécanique en interaction avec le modèle de vaisseaux, d'une part ;
- le contrôleur de position, d'autre part.

Nous travaillons à la définition de la fonction qui nous permettra de définir une valeur en fonction de la qualité d'un individu au vu des résultats de simulation. Nous pensons quantifier l'énergie nécessaire à la pénétration de l'endoscope et également nous intéresser à la profondeur de pénétration. Supposons qu'elle soit correctement définie, le superviseur, quand il reçoit cette valeur, arrête la simulation, réalise un pas de l'algorithme et relance une autre simulation avec un autre individu. Comme de coutume quand on utilise un algorithme génétique, ce processus est un gros consommateur de temps calcul directement lié au nombre important de simulations à réaliser. Nous devons donc dans le futur nous intéresser au module de simulation pour diminuer ce temps.

5 Résultats

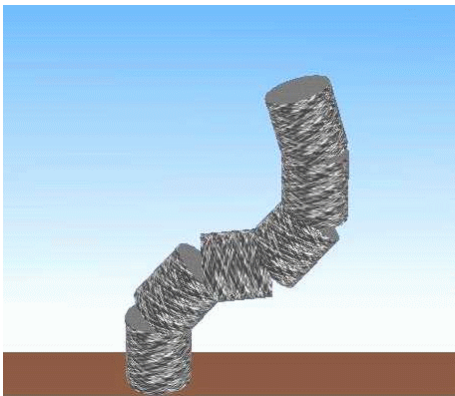


Figure 7: Asservissement en position

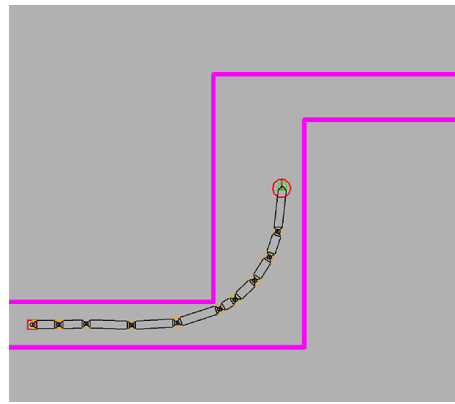


Figure 8: Adaptation à la forme du réseau

Nous proposons ici deux principaux résultats de ce travail en cours. Le premier est la simulation du contrôle en position d'un modèle tridimensionnel d'endoscope. La description géométrique et mécanique est développée sous forme d'un module GASP. Il est associé à un autre module qui permet de réaliser le contrôle en position de chacun des segments par rapport à celui qui le précède. Un résultat de calcul est présenté sur la figure 7. Les angles obtenus sont bien ceux que nous avons spécifiés en entrée du contrôleur.

Le second est notre premier essai dans le domaine des algorithmes génétiques. Nous avons défini un modèle simplifié bidimensionnel pour lequel la longueur des segments est contrôlée par l'algorithme génétique. La figure 8 présente l'adaptation de la longueur de chaque segment pour obtenir la pénétration la plus importante dans les vaisseaux.

6 Conclusion

Nous avons présenté notre travail en cours dont l'objectif est la conception virtuelle aidée par ordinateur de micro-endoscopes actifs. L'objet à terme de ce projet est ainsi de définir et développer des moyens de prototypage virtuel pour optimiser la topologie (i.e. la structure), la configuration (i.e. les angles entre chaque module) ainsi que la commande de micro-endoscopes.

Le processus de conception du micro-endoscope intègre la simulation, l'optimisation et la commande. L'optimisation est réalisée à partir des Algorithmes Évolutionnaires. L'évaluation de chaque individu se fait par l'utilisation d'une simulation mécanique ayant nécessité la définition :

- d'un modèle mécanique ;
- d'un modèle de contact ;
- d'une commande des articulations.

Dans le futur nous souhaitons :

- améliorer le modèle de contact ;

- définir un modèle de vaisseaux plus réaliste ;
- utiliser une base de données médicales en collaboration avec le LTSI ;
- diminuer le temps de calcul de l'algorithme d'optimisation en affiner les techniques d'évaluation des individus et les appels à la simulation.

Références

- [1] B. Arnaldi, S. Donikian, A. Chauffaut, R. Cozot, and G. Thomas. Real time simulation platform for dynamic systems. In *IROIS'97 (International Conference on Intelligent Robots and Systems). Workshop on Dynamic Simulation: Methods and Applications*, 1997.
- [2] T. Bäck. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practise*. Oxford University Press, 1996.
- [3] M.C. Carrozza, L. Lencionni, B. Magnani, P. Dario, D. Reynaerts, M.G. Trivella, and A. Pietrabissa. A microrobot for colonoscopy. In *Seventh International Symposium on Micromachine and Human Science*, pages 223–228, 1994.
- [4] A. Chauffaut and S. Donikian. Gasp: a general animation and simulation platform. In *ISMCR '97, XIV IMEKO World Congress*, 1997.
- [5] O. Chocron. *Conception Evolutionnaire de Systèmes Robotiques*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2000.
- [6] P. Dario, C. Paggetti, N. Troisfontaine, E. Papa, T. Ciucci, M.C. Carrozza, and M. Marcacci. A miniature steerable end-effector for application in an integrated system for computer-assisted arthroscopy. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1573–1579, 1997.
- [7] V. de Sars, J. Szewczyk, and P. Bidaud. Conception de micro-structures actives distribuées. In *Journées Micro-robotique*, 2000.
- [8] S. Donikian, A. Chauffaut, T. Duval, and R. Kulpa. Gasp: from modular programming to distributed execution. In *Computer Animation'98. IEEE*, 1998.
- [9] G. Dumont and F. Chapelle. Simulation multi-physique pour la conception en micro-robotique. In *Journées Micro-robotique*, 2000.
- [10] G. Dumont, F. Chapelle, O. Chocron, and P. Bidaud. Prototypage virtuel d'un micro-endoscope. In *Journée thématique PRIMECA*, 2000.
- [11] David E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989.
- [12] J.H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor:The University of Michigan Press, 1975.
- [13] G. Lim, K. Minami, K. Yamamoto, M. Sugihara, M. Uchiyama, and M. Esashi. Multi-link active catheter with snake like motion. *Journal Robotics*, 14:499–506, 1996.
- [14] Z. Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag, 1992.
- [15] K-T. Park and M. Esashi. An active catheter with integrated circuit for communication and control. In *Microelectromechanical Systems (MEMS), 12th International. IEEE*, 1999.