

Perception Visuelle en Robotique : Profiter de la Biologie pour faire des Systèmes Adaptatifs.

[http://www.inria.fr/\(Thierry.Vieville|Olivier.Faugeras\)](http://www.inria.fr/(Thierry.Vieville|Olivier.Faugeras))

19 octobre 2001

Introduction

Comment s'orienter dans un espace tridimensionnel, éviter des obstacles, détecter un mouvement, suivre un objet, se guider sur une trajectoire, ou simplement rester en place? Demandez aux poissons rouges : ces "systèmes" extrêmement performants font cela automatiquement et en permanence.

Pourtant, dans leur petit cerveau, ce n'est pas une analyse "sémantique" des images qui leur permet de traiter les informations visuelles utiles à leurs tâches perceptives. De même, une grenouille gobant une mouche utilise son système visuel sans vraiment "comprendre" le monde qui l'entoure. La même grenouille goberait tout autant un cailloux qui serait projeté devant elle!

Ce qui est pertinent pour les systèmes visuels biologiques peu évolués, correspond uniquement à l'analyse des aspects *géométriques* (mesure de position et d'orientation, mesure de la taille des objets, etc..) et *cinématiques* (détection et mesure des déplacements d'un objet) de la scène observée.

A ce jour, la théorie de la vision artificielle permet justement d'appréhender ces deux aspects.

Comment modéliser cette forme de perception visuelle pour l'utiliser dans un système robotique? A partir de l'analogie biologique, il s'agit de développer des mécanismes similaires en installant des caméras sur des robots pour les doter de comportements perceptifs, certes rudimentaires, mais tout de même autonomes. Même vue ainsi, c'est une question difficile [14, 11], à laquelle les scientifiques ont partiellement répondu en allant chercher des publications un peu oubliées de mathématiciens de la fin du 19ème siècle et du début du 20ème [4, 13], spécialisés dans ce qu'on appelle aujourd'hui la géométrie projective¹ réelle. Les travaux récents s'inscrivent dans la continuité de ce qu'avaient étudié les photogrammètres² [16] au milieu du vingtième siècle.

1. La géométrie projective est l'étude des points, droites, plans (donc des objets "linéaires") indépendamment des transformations qu'ils peuvent subir sans être altérés.

2. La photogrammétrie est l'utilisation de photographies stéréoscopiques pour les relevés topographiques, par exemple les formes et dimensions des reliefs géographiques.

L'approche géométrique et cinématique : un modèle robotique et biologique.

La première étape, pour se focaliser sur les aspects géométriques et cinématiques, est de s'intéresser seulement aux contours des objets. Notre grenouille, à ce stade, détecte la silhouette de la mouche.

Une vision basée sur les contours des objets. De l'image observée, seuls les éléments liés à des points de fort contraste (contours des objets, points lumineux ..) sont retenus car ils correspondent à des éléments essentiels de la scène et leur mesure ne dépend que peu de l'éclairage ou des propriétés photométriques de la scène (voir Fig 1), caractéristiques de peu d'intérêt dans le contexte décrit précédemment.



FIG. 1 – D'une image (vue de gauche), seuls les points de fort contraste (vue de droite) qui forment les contours sont utilisés.

On réduit ainsi la quantité énorme d'information à traiter (un flux vidéo couleur contient environ 20 millions d'informations élémentaires par seconde) en éliminant ce qui dépend principalement de la texture ou de la réflectance³ des objets, pour ne garder que ce qui est lié à leur forme ou à leur position.

C'est exactement ce qui se passe dans les systèmes visuels biologiques où de tels détecteurs de primitives géométriques sont connus depuis quelques années [12].

Une vision basée sur l'analyse des mouvements La seconde étape consiste à s'intéresser aux aspects cinématiques, c'est à dire faire l'analyse du mouvement.

On distingue le mouvement "propre" (c'est à dire celui de l'observateur, en l'occurrence notre grenouille ou un robot avec sa caméra) par rapport à l'environnement considéré comme immobile ou les mouvements rigides⁴ des objets regardés (pour notre grenouille, la mouche

3. La "réflectance" d'une surface correspond à sa façon de réfléchir la lumière: elle peut-être *lambertienne*, c'est à dire réfléchir cette lumière de manière diffuse, dans toutes les directions, comme une surface mate ou un verre dépoli. A l'opposé, elle peut-être *spéculaire*, c'est à dire réfléchir la lumière reçue dans une direction unique comme un miroir ou une surface brillante.

4. On ne considère, dans cette étude, que les mouvements rigides, c'est à dire un déplacement sans déformation de l'objet ou de la caméra.

.. ou le caillou). Les deux induisent des variations au sein de l'image observée, sur la rétine de l'oeil ou de la caméra.

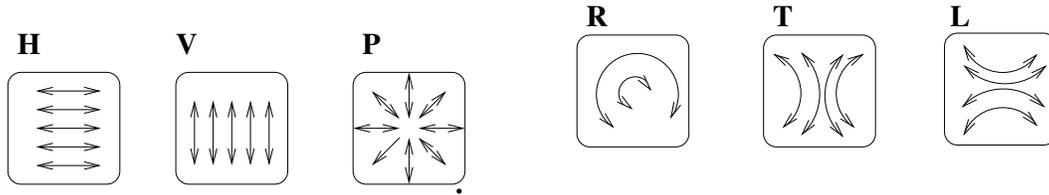


FIG. 2 – Perception, au 1er ordre, d'un mouvement rigide (voir texte).

Comme illustré Fig. 2 nous pouvons distinguer trois types de mouvements, les mouvements panoramiques, en profondeur et angulaires. Ce sont des briques de base qui se combinent en pratique.

Mouvements panoramiques. Les composantes panoramiques du mouvement sont liées à une translation pure, c'est à dire à un déplacement uniquement horizontal ou vertical de la caméra ou de l'objet observé, sans tenir compte du fait qu'ils puissent avancer ou reculer (représentés par **H** et **V** Fig. 2).

Elles permettent de mesurer la profondeur relative des points d'une scène en utilisant le fait que *les objets proches bougent en valeur relative plus que les objets lointains* (c'est l'effet de parallaxe). Ces mouvements panoramiques permettent aussi de suivre visuellement un objet en mouvement en effectuant une poursuite oculaire.

Mouvement en profondeur. Les composantes en profondeur du mouvement sont liées à une translation de l'objet ou de la caméra le long de la direction du "regard" (noté **P** sur la Fig. 2).

Elles permettent de détecter une cible qui s'éloigne (par exemple une "proie") ou qui se rapproche (par exemple un "prédateur") et de mesurer le "temps de collision", c'est à dire le délai nécessaire pour que la distance en profondeur de la cible à la caméra s'annule.

Mouvements angulaires. Enfin, les composants angulaires du mouvement sont liés à des rotations de l'objet ou de la caméra (notées **R**, **T** ou **L** sur la Fig. 2).

Elles peuvent être facilement compensées, ce qui permet de stabiliser l'image d'une vue dynamique. En vision biologique, un de ces mécanismes de compensation est le réflexe opto-cinétique. Il est souvent associé aux capteurs de force, dits inertiels, qui se trouvent dans l'oreille interne des animaux et des humains et qui forment le système vestibulaire. Le réflexe vestibulo-oculaire qui lui est associé permet de mesurer les accélérations angulaires et linéaires de la tête pour stabiliser le regard.

Depuis peu, des mécanismes similaires sont utilisés en robotique.

Mais les rotations servent aussi à "auto-calibrer" le capteur visuel de la caméra.

En effet, notre grenouille ne peut estimer correctement le mouvement de la mouche en combinant ces briques de base, que si elle peut se *calibrer*.

Un capteur visuel se calibre lui-même. Lors des mouvements angulaires de l'oeil, la vue de la scène n'est pas déformée sur la rétine. Ceci est dû au fait que l'on se contente de

regarder la scène sous un autre angle (Fig. 3). Contrairement à ce qui se passe lors d’une translation qui engendre du parallaxe, une rotation correspond à un simple “déplacement angulaire” de l’image de la scène observée.

Dans le cas d’une caméra, si elle est mal calibrée, une rotation peut en revanche générer une déformation. Si au cours d’un déplacement angulaire il apparaît une déformation inattendue de l’image, c’est que les paramètres géométriques ou optiques du capteurs sont erronés. En les modifiant de façon à réduire la déformation observée, il est possible de s’approcher de valeurs plus exactes.

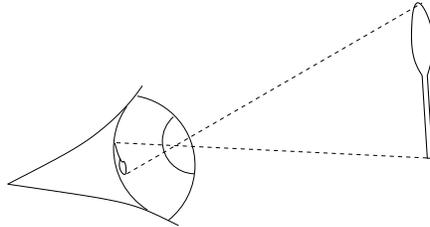


FIG. 3 – Lors d’une rotation de l’oeil la vue d’un objet subit une simple déplacement angulaire sur la rétine, sans déformation.

En pratique, beaucoup d’algorithmes d’“auto-calibration” mettent en oeuvre les principes précédents pour estimer ou corriger les paramètres de calibration géométriques et optiques du capteur.

Introduits depuis une décennie, ces procédés peuvent d’ailleurs être aussi utilisés avec d’autres déplacements que des rotations [15].

Pourquoi l’oeil est-il rond? Au delà de ces algorithmes, le fait que notre grenouille ait les yeux parfaitement ronds, peut être aussi lié à cette propriété géométrique des rotations.

L’oeil est en effet le seul organe moteur qui ait une telle régularité géométrique chez presque tous les animaux. La nécessité de réaliser des rotations exactes de l’oeil lors du passage d’une vue à l’autre viendrait de la nécessité de pouvoir recoller les deux vues (sans tenir compte de la profondeur des objets, leur éventuelle occlusion, etc..) par un simple “glissement angulaire” d’image.

En faisant des rotations pures, l’oeil se construit une vue panoramique de son environnement. On utilise ce même procédé en vision artificielle pour construire de grandes vues composites (on parle de mosaïques) à partir de plusieurs photos, comme montré Fig. 4

L’avantage d’avoir deux yeux. Avec un oeil de chaque côté de la tête notre grenouille est désavantagée par rapport aux mammifères supérieurs : elle voit deux images totalement séparées. Cette paire d’image est donc impossible à combiner.

En revanche, avec deux yeux frontaux, la combinaison des images dont nous avons parlé précédemment en analyse du mouvement peut se faire, non plus au cours du temps, mais, instantanément (ici le déplacement est spatial et non plus temporel), comme illustré Fig. 5.



FIG. 4 – Mosaïque d’images construite à partir de plusieurs photos séparées par des rotations (vue reproduite avec la gracieuse permission de www.realviz.com).

Ce travail se généralise aussi au cas où plus de deux caméras sont utilisées. [8, 5]. À partir d’une collection de photos, la vue tri-dimensionnelle d’une scène réelle peut donc être déterminée.

Vision et orientation spatiale Est-ce à dire que seule l’analyse des rotations est utile à notre grenouille? Bien au contraire, nous l’avons vu, les composantes en translation lui apportent des informations tout aussi précieuses : mesures de profondeur relative ou de temps de collision. Mais ces mouvements de translation servent aussi à la perception de la verticale, l’identification de l’horizon, etc.. bref à la perception de son orientation spatiale.

En effet, dans le cas d’une translation pure, les lois élémentaires de l’optique nous enseignent que les points infiniment lointains, à l’horizon, restent *immobiles*. Ces points correspondent à des points de fuite (comme illustré Fig. 6), c’est à dire des directions de l’espace. Visuellement, ils se détectent directement, car ils sont stationnaires.

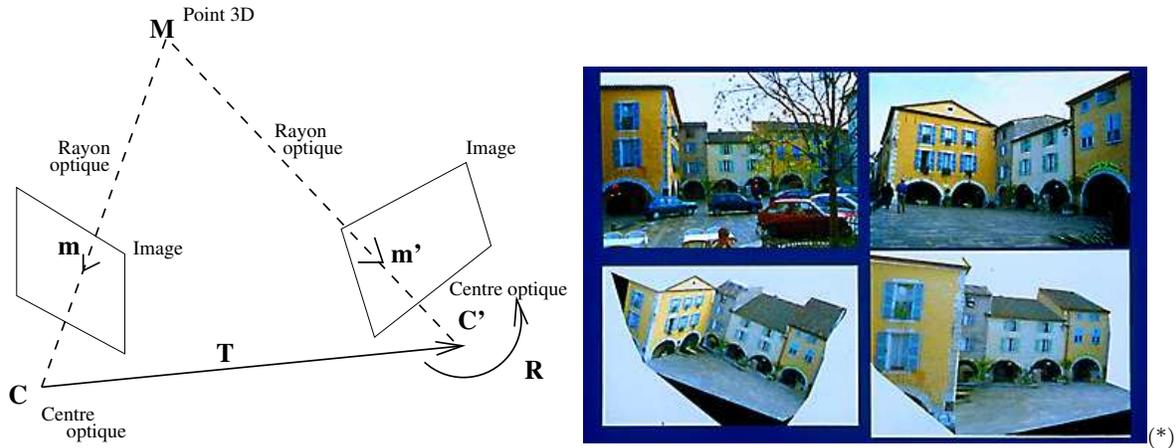
Un des points de fuite les plus importants est celui qui correspond à la direction verticale. Il permet à notre grenouille ou robot de stabiliser son regard et son corps et d’éviter tout “roulis” et “tangage”.

La direction verticale se détecte à partir d’informations visuelles (par exemple l’orientation verticale des arbres et bâtiments voir Fig. 6) ou inertielles (à partir d’un “fil à plomb” électronique, un inclinomètre, qui se base sur la gravité terrestre).

De manière plus théorique, ce que la géométrie nous enseigne est que les points de fuite -à l’horizon- sont sur un plan, dit à l’infini, là où les “parallèles se coupent”. Ce plan contient donc les “directions” de l’espace. Il est alors naturel (et mathématiquement exact !) de penser que connaître ce plan permet de s’orienter dans la scène tri-dimensionnelle dont l’image est issue.

Utiliser la vision en robotique autonome.

Ayant achevé son travail d’analyse visuelle, notre grenouille peut (enfin !) programmer le mouvement qui va lui permettre de gober sa mouche.



En stéréoscopie, on considère deux caméras dont les centres optiques sont notés C et C' et dont la position relative est spécifiée par une translation T et l'orientation relative par une rotation R . Pour un point de l'espace M , le fait que le rayon optique passant par m issu de C et le rayon optique passant par m' issu de C' se coupent en M induit une contrainte géométrique, dite "épipolaire". En considérant les équations correspondant à ces contraintes épipolaires pour tous les points de la scène observée (i) la distance absolue entre les points observés et les caméras peuvent être calculées, tandis que (ii) les positions et orientations relatives des caméras et les paramètres optiques de deux caméras peuvent être "auto"-calibrées en partie.

FIG. 5 – Percevoir la profondeur grâce à la géométrie.

De la perception visuelle aux tâches robotiques. De même en robotique, c'est, entre autre, à partir de mesures visuelles que les tâches motrices peuvent être réalisées de manière autonome et contrôlée. Là encore l'analogie biologique avec les mouvements oculaires, le contrôle de la posture, etc.. est importante.

Par exemple, parmi ces mécanismes de perception active, les saccades oculaires⁵ sont utilisées aussi bien en robotique que chez l'animal (Fig. 7).

D'autres applications, comme par exemple en robotique autonome (Fig. 8), profitent des mêmes développements.

Les éléments de théorie discutés précédemment sont donc étroitement liés à la conception de système robotiques. De plus comme en robotique les déplacements sont souvent très particuliers (rotation autour d'un axe fixe, mouvement limité à un plan), cela simplifie et enrichit l'analyse visuelle de la scène [17].

Les limites de la vision robotique. Les avancées dues à l'approche géométrique n'ont pas pour autant résolu tous les problèmes de la vision par ordinateur.

Prenons un exemple simple, un système robotique qui doit s'orienter dans un environnement naturel comme la forêt. Un tel endroit se prête évidemment très mal à une modélisation

5. Lors de l'exploration visuelle d'une scène, notre stratégie perceptive consiste à fixer une image puis se tourner rapidement vers un autre point de vue. Schématiquement, Le cerveau effectue donc une "suite de photos" plutôt qu'un "travelling".

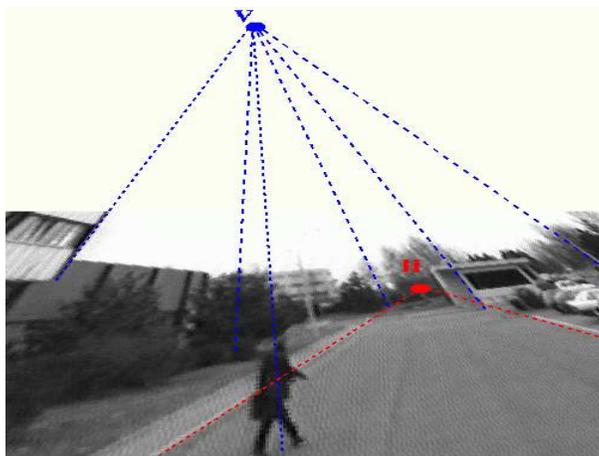


FIG. 6 – *Détection de l’horizon et de la verticale : les directions moyennes verticales des bords de bâtiments, arbres, etc. d’une part et des bords de la route, supposée droite, d’autre part sont des “parallèles” qui se coupent à “l’infini”, c’est à dire l’horizon.*

géométrique. Donc les techniques développées précédemment ne vont pas bien s’appliquer. Pourtant un insecte aussi peu évolué que la mouche n’a aucune difficulté à s’orienter malgré le fait que son “ordinateur embarqué” soit extrêmement rudimentaire, puisque limité à quelques milliers de neurones.

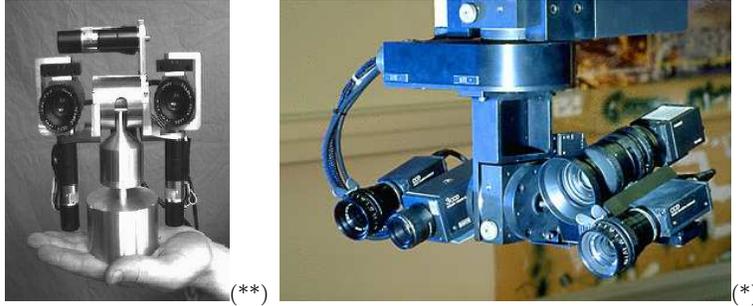
Il semblerait donc que l’on soit passé à côté d’un ou plusieurs aspects absolument essentiels de la vision biologique. L’un d’eux est *l’adaptation* [9, 2] . En vision, cela inclut *l’attention*, la capacité à focaliser notre attention, c’est à dire concentrer dynamiquement notre perception visuelle sur une partie de la scène à observer, mais aussi sur les attributs opportuns (couleur, forme, ..) de cette scène pour la tâche perceptive en cours, ce qui nous permet de réagir rapidement et efficacement. Cela inclut aussi la *mémoire*, c’est à dire la capacité à utiliser des informations a priori sur la scène observée pour n’en analyser que les aspects inattendus. Il faut aussi y rattacher la perception *holistique* qui permet de regrouper instantanément plusieurs éléments disparates pour “halluciner” un objet déjà connu à partir d’une vue partielle de celui-ci.

Fédérer ces concepts sous la notion d’adaptation

La notion d’adaptation est le concept à la fois le plus répandu dans les sciences de la vie ou de l’ingénieur et peut-être le moins bien défini des deux domaines, sauf en automatique [1] dont les concepts présentés ici sont issus. Et pourtant, il correspond à une idée très précise, facile à formaliser (Fig 9).

De plus, dans les systèmes biologiques c’est exactement cette propriété d’adaptabilité qui permet à des sous-systèmes élémentaires (réflexes) de former des comportements élaborés [3] ... et aux animaux de survivre !

C’est sûrement en rendant les mécanismes précédents (basés sur la géométrie et la cinématique) adaptatifs, de même qu’en évoluant vers des formes animales plus élaborées



L’analogie avec les systèmes biologiques a conduit à la conception de caméras dotées des mêmes fonctionnalités que les yeux. Leurs déplacements permettent de contrôler la direction du regard pour explorer l’environnement visuel, stabiliser la vision si le sujet se déplace, suivre un objet qui bouge, etc..

Bien entendu, ces systèmes robotiques ne sont pas anthropomorphiques.

En vidéo-conférence ou en télé-surveillance les mécanismes sous-jacents sont désormais couramment utilisés.

FIG. 7 – “Têtes” robotiques artificielles.

les mécanismes visuels en place chez les batraciens sont devenus plus performants, que les scientifiques vont pouvoir dépasser les limites décrites précédemment.

En biologie par exemple, le cervelet, qui se situe à l’arrière du crâne joue en grande partie ce rôle: il permet aux réflexes de s’adapter et d’être enchaînés pour réaliser des tâches automatiques (programmes moteurs) utilisées dans la vie courante.

L’adaptation comme un choix d’architecture.

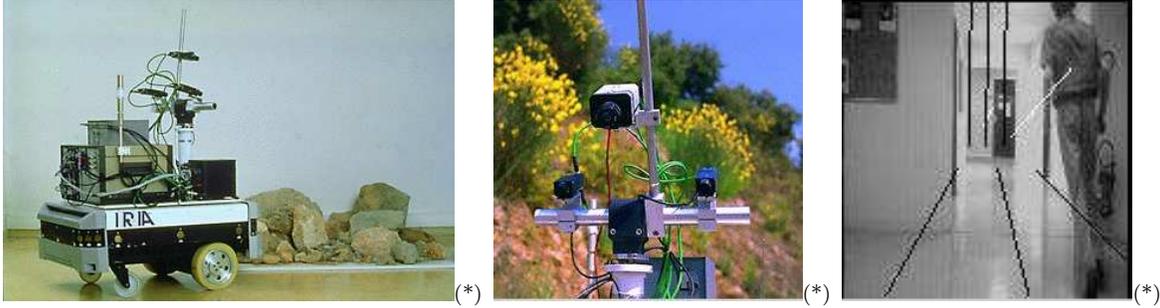
Si l’on considère l’architecture logicielle du robot, l’idée d’adaptation revient simplement à introduire une hiérarchie entre un objet observé et un sujet observant, comme détaillé Fig. 10

A un premier niveau des “réflexes” sont en fonctionnement (par exemple le suivi d’une cible visuelle en mouvement, ici la mouche de notre grenouille), tandis qu’un second mécanisme observe ce fonctionnement et adapte certains paramètres pour réaliser, au mieux, la tâche choisie.

Le second mécanisme se base sur *une vue plus abstraite* du fonctionnement du premier (dans notre exemple, à ce niveau sera choisi un modèle de la cible suivie : objet complètement rigide (cailloux) ou objet lui même animé (mouche), en regardant quel modèle correspond le mieux aux données l’erreur d’appréciation de notre grenouille sera évitée). Pour y parvenir, il faut donc des modèles des objets du monde observé, construits à partir d’informations a priori sur cet environnement.

Cette vue résume finalement les caractéristiques les plus pertinentes pour la tâche à accomplir. Cela permet de gagner en modularité et de mieux contrôler l’ensemble du système. Ces paramètres permettent aussi de choisir quel réflexe élémentaire utiliser à un instant donné (ce ne sera pas le même “réflexe” pour un cailloux ou pour une mouche). L’enchaînement de ces choix détermine des “programmes” combinant les briques élémentaires.

Par ailleurs, dans un tel paradigme, les paramètres à estimer à partir de conditions



Un système visuel 3D rudimentaire à trois caméras permet à un robot mobile d'éviter une personne. Il ne différencie évidemment pas les obstacles entre eux (humain, mur, ..) mais se contente de détecter les bords gauche et droit de son "couloir" de navigation.

Un cerveau de mouche [6], par exemple, n'a sûrement pas une cognition beaucoup plus évoluée.

FIG. 8 – Navigation d'une plate-forme mobile.

initiales connues sont *constraints*, avec des bornes de variations et un ordre de grandeur de précision sur les valeurs estimées. Cela permet d'utiliser des algorithmes d'estimation "locale" fiables.

L'adaptation comme un mécanisme d'apprentissage paramétrique.

L'adaptation peut aussi être vue, au niveau du sujet, comme un processus d'apprentissage très spécifique.

En effet, les processus d'apprentissage sont a priori plus généraux que ceux d'adaptation car ils sont censés permettre d'estimer des notions complexes relevant du cognitif, comme par exemple l'apprentissage d'une langue .

En comparaison, un processus d'adaptation se limite à l'estimation de paramètres. En d'autres termes, on lui "insuffle" toutes nos connaissances a priori, regroupées dans des *modèles* qui sont des données structurelles et fixes. Seules des variantes de ce modèle ou de certains de ses paramètres sont à ajuster.

Une telle approche n'empêche pas de choisir parmi plusieurs modèles à l'aide d'un paramètre "qualitatif" qui spécifie quel modèle est sélectionné ou même de définir des raisonnements logiques liés aux choix du modèle sous-jacent.

Pour résumer, nous pouvons considérer l'adaptation comme un processus d'apprentissage très spécifique mais en pratique très efficace. Ici, adapter la vision de notre robot à un environnement non prédéterminé revient à lui insuffler toutes nos connaissances a priori sur les objets qu'il observe en les regroupant dans des "modèles". Ces modèles seront identifiés en estimant leurs paramètres géométriques ou cinématiques.

L'adaptation au sein de la perception visuelle.

En vision artificielle, les caméras n'ont d'abord été utilisables que dans des conditions très limitées car il ne fallait pas que les paramètres de calibration estimés a priori, puissent être modifiés.

Mais la mise au point des mécanismes d'auto-calibration a permis les premières mise en oeuvre de processus adaptatifs fondés sur des modèles géométriques de la caméra: des modèles *internes*.

Les cinq clés de l'adaptation.

Pour le dictionnaire, adapter veut dire changer un “comportement” pour lui permettre de réagir dans de nouvelles “circonstances”. Plus précisément il y a deux acteurs: (1) l'objet, c'est à dire ce qui est adapté (c'est souvent un mécanisme, un instrument, un dispositif, un réflexe ou un comportement) et (2) le sujet, c'est à dire le mécanisme qui adapte.

Mais une telle définition n'est pas suffisante. Prenons, par exemple, le cas d'un animal qui change de conditions de vie. Il est clair qu'il doit “adapter” son comportement au nouvel environnement dans lequel il est plongé. C'est ce qu'il fera, mais à partir de ce qu'il savait déjà faire avant c'est à dire d'un modèle de référence. Bien sûr, ceci a lieu seulement si il y est obligé par une variation de son environnement. D'autre part, il le fera dans un but précis, sa survie en l'occurrence.

Dans un processus d'adaptation, il y a donc en plus d'un objet et d'un sujet: un modèle de référence qui permet de passer d'un fonctionnement habituel et à un nouveau fonctionnement et une tâche à accomplir qui motive le passage d'un comportement à un autre.

Tout ceci a lieu dans un environnement dont une modification suscite le processus d'adaptation.

Il y a finalement cinq éléments en jeu et il semble raisonnable d'énoncer: l'adaptation correspond à un processus par lequel un *sujet*, lorsqu'il enregistre une variation de l'*environnement*, modifie les paramètres d'un *objet*, à partir d'un *modèle de référence*, dans le but d'accomplir une *tâche perceptive spécifique*.

FIG. 9 – Une définition de l'adaptation.

Désormais les chercheurs travaillent sur la généralisation de ces idées en construisant des modèles des objets observés: des modèles *externes*. La tâche est évidemment bien plus vaste. Mais la mise en place de ces modèles externes permettra de prendre en compte des connaissances de plus haut niveau de la scène observée et mènera à une vision plus cognitive (voir Fig. 11).

Conclusion

L'approche géométrique de la vision est désormais très largement publiée. Elle est enseignée à l'université et dans les écoles d'ingénieurs [10] et a été validée à partir de bases de données d'images fournies notamment par des industriels, en utilisant des moyens informatiques considérables. Grâce à cette validation, des sociétés (souvent des start-up, comme Realviz à Sophia Antipolis) ont été créées pour développer les applications les plus diverses à partir de ces outils. De l'insertion cohérente d'images de synthèse au sein d'images réelles (on parle de réalité augmentée) à la reconstruction de volumes 3D à partir de photos, tous ces mécanismes sont très utiles, par exemple, en post-production cinématographique, conception architecturale, imagerie médicale et bien sûr en robotique.

Vision artificielle et biologique ne peuvent être confondues: les modèles de connaissance des mécanismes étudiés en neurosciences diffèrent des modèles de fonctionnement utilisés en robotique, les deux types de systèmes étant si différents. Il n'y a non plus lieu de développer une robotique plus ou moins anthropomorphique: on fera sûrement mieux en se libérant des contraintes biologiques. En revanche, dans les deux cas, les systèmes doivent accomplir des tâches semblables et émettre des hypothèses sur les caractéristiques de l'environ-

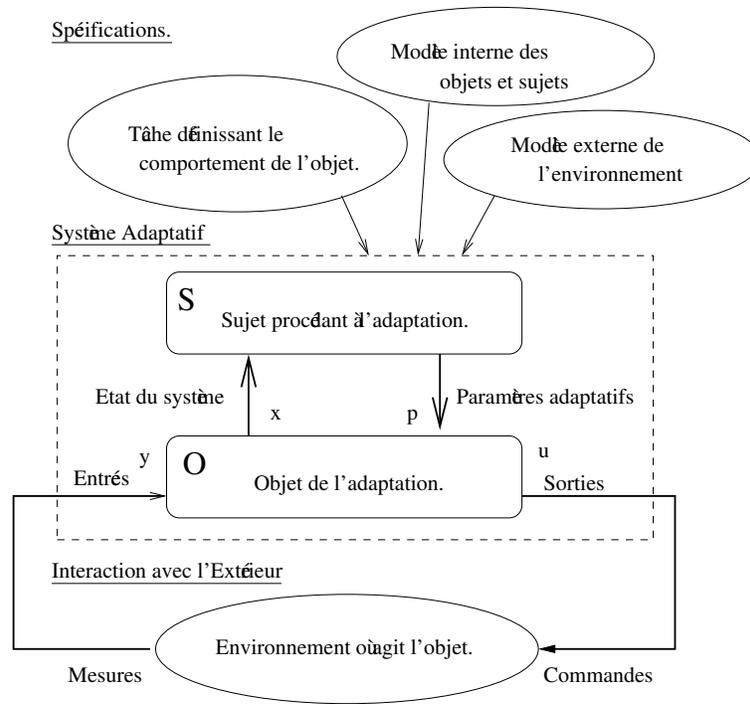
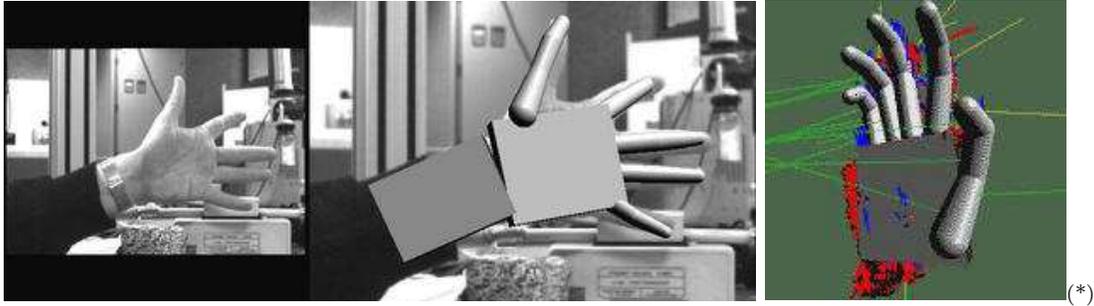


FIG. 10 – Modèles et architecture d'un système adaptatif.

nement qu'ils perçoivent à partir des informations sensorielles[7]. C'est donc bien au niveau de la modélisation que les deux disciplines se retrouvent. Et cette synergie stimulante entre Sciences de la Vie et Mathématiques Appliquées permettra de mieux comprendre les phénomènes de perception biologiques et d'améliorer les algorithmes de vision robotique ..
 .. et de faire des robots un peu plus évolués que les crapauds.

Références

- [1] K. J. Astrom and B. Wittenmark. *Adaptive control*. Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [2] A. Berthoz and G. Melvill Jones. *Adaptive Mechanism in Gaze Control*. Elsevier, Amsterdam, 1985.
- [3] Y. Burnod. *An adaptive neural network: the cerebral cortex*. Masson, Paris, 1993. 2nd edition.
- [4] M. Chasles. Question No. 296. *Nouv. Ann. Math.*, 14:50, 1855.
- [5] O. Faugeras, Q. Luong, and T. Papadopoulos. *The Geometry of Multiple Images*. MIT Press, 2001.
- [6] N. Franceschini. De la mouche au robot : Reconstruire pour mieux comprendre. In V. Bloch, editor, *Cerveaux et Machines*, pages 247–270. Hermès, Paris, 1999.
- [7] J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 365 Broadway, Hillsdale, New Jersey 07642, 1986.
- [8] R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2000.
- [9] J. H. Holland. *Adaptation in Naturel and Artificial Systems*. PhD thesis, university of Michigan, 1975.
- [10] R. Horaud and O. Monga. *Vision par ordinateur : Outils fondamentaux*. Hermès, Paris, 1995.
- [11] B. Horn. *Robot Vision*. MIT Press, 1986.
- [12] D. Hubel. *L'oeil, le cerveau et la vision : les étapes cérébrales du traitement visuel*. L'univers des sciences. Pour la science, 1994.
- [13] E. Kruppa. Zur Ermittlung eines Objektes aus zwei Perspektiven mit innerer Orientierung. *Sitz.Ber. Akad. Wiss., Wien, math. naturw. Kl., Abt. IIa.*, 122:1939–1948, 1913.
- [14] D. Marr. *Vision*. W.H. Freeman and Co., 1982.
- [15] S. J. Maybank and O. D. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera. *The International Journal of Computer Vision*, 8(2):123–152, Aug. 1992.



L'utilisation de modèles a priori permet de détecter et d'observer des objets complexes (ici les coordonnées articulaires d'une main) en les représentant par un faible nombre de paramètres pertinents. C'est l'adaptation de ces paramètres qui permet d'estimer les propriétés nécessaires à la reconnaissance de cette main et à son suivi au fur et à mesure du déroulement d'un geste.

FIG. 11 – *Utilisation de modèles a priori de la scène observée.*

[16] C. C. Slama, editor. *Manual of Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, fourth edition, 1980.

[17] T. Viéville and D. Lingrand. Using specific displacements to analyze motion without calibration. *The International Journal of Computer Vision*, 31(1):5–29, 1999.

En savoir plus

Vision par ordinateur, Outils fondamentaux, Radu Horaud et Olivier Monga, Editions Hermès, 1995;

<http://www.inrialpes.fr/movi/people/Horaud/livre-hermes.html>

(partiellement disponible en <ftp://ftp.inrialpes.fr/pub/movi/cours/vision-3d.pdf> sous forme de notes de cours).

Cerveaux et Machines, V. Bloch (ed), Edition Hermès, 1999.

Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric View Point, Olivier D. Faugeras, MIT-press, 1993;

<http://mitpress.mit.edu/catalog/item/default.asp?ttype=2&tid=8427>

(*) Photos mises gracieusement à disposition par la phototèque de l'INRIA <http://www.inria.fr/multimedia>

(**) Photo mise gracieusement à disposition par l'Université d'Oxford <http://www.robots.ox.ac.uk/ActiveVision>