

La réalité virtuelle comme outil pour l'évaluation, la visualisation et la validation de l'accessibilité d'un lieu de vie.

R. Otmani - A. Pruski – Lasc, Université de Metz
K. Belarbi – Lar Université Mahmoud Mentouri Constantine, Algérie
{Otmani,pruski}@univ-metz.fr kbelarbi@yahoo.com

Résumé :

L'évaluation de l'accessibilité dans un environnement bâti est nécessaire lorsque les capacités physiques de la personne ne correspondent plus aux nécessités de l'habitat ce qui survient en général après un accident de la vie. Le handicap généré ne permet plus d'évoluer comme auparavant rendant indispensable une adaptation de l'habitat. Nous proposons une méthode d'évaluation de l'accessibilité à la manipulation afin d'établir le constat mais aussi pour proposer une visualisation et une validation des modifications de l'environnement. Le processus d'évaluation de l'accessibilité est formulé comme un problème de résolution de l'inverse cinématique d'une structure articulée composée de la personne et de son dispositif de mobilité en considérant l'amplitude de ses capacités physiques résiduelles.

Mots clés : accessibilité, réalité virtuelle, inverse cinématique

1. Introduction

L'accessibilité désigne la capacité d'une personne à appréhender son environnement et à le maîtriser. Elle se réfère à des objets, des bâtiments, de l'information et de la technologie disponibles dans des activités quotidiennes de toute personne. Pour les personnes handicapées la notion d'accessibilité est particulièrement présente au quotidien puisqu'en général un environnement est conçu pour des personnes ayant toute leurs facultés physiques, sensorielles et cognitives. La réalité virtuelle est une technologie qui peut apporter une contribution importante dans la détermination de plusieurs caractéristiques de l'accessibilité. Elle permet de vérifier l'état de l'accessibilité par une évaluation de l'accès aux objets, de leur manipulation et des mouvements qu'il est possible de réaliser dans un environnement. Elle permet également de vérifier si les plus-values apportées par des modifications virtuelles sont conformes aux attentes. Dans un souci de communication, elle permet de visualiser et de partager avec l'occupant l'impression obtenue après réalisation des modifications. Cet aspect n'est pas négligeable puisqu'il permet notamment de dialoguer objectivement avec l'occupant des lieux

ce qui est souvent difficile à partir de plans en 2D. Nous proposons dans ce papier de décrire un travail qui consiste à utiliser cette technologie pour déterminer l'accessibilité dans le cadre de la manipulation d'objet dans un lieu de vie. L'approche que nous avons utilisée est formulée comme un problème de cinématique inverse d'une structure articulée composée de la personne et de son dispositif de déplacement en vérifiant que la main de la personne peut atteindre des objets dans l'environnement en tenant compte des contraintes liées à son degré d'invalidité et de celles liées à la nature de l'environnement.

2. Différentes approches et méthodologies utilisées dans l'évaluation de l'accessibilité.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de consensus sur la méthodologie à utiliser dans l'évaluation de l'accessibilité d'un logement. Dans la plupart des pays industrialisés des normes ou des préconisations sont disponibles permettant aux professionnels du bâtiment d'être guidé dans la conception de constructions neuves. Il n'est en général pas prévu de recommandations, sauf celles dictées par le bon sens, pour l'aménagement de l'intérieur des logements. En France, une loi [Loi05] régit des règles pour les constructions neuves que ce soit des logements collectifs ou individuels. La loi définit le handicap dans sa diversité par toute limitation d'activité ou restriction de participation à la vie en société due à une altération d'une ou plusieurs fonctions physiques, sensorielles, mentales, cognitives ou psychiques. Un arrêté du 1er août 2006 fixe les dispositions relatives à l'accessibilité aux personnes handicapées des bâtiments d'habitation collectifs et des maisons individuelles lors de leur construction. Ces dispositions sont générales permettant un accès global essentiellement dans le cadre de la mobilité. Tous les pays industrialisés ont leurs préconisations pour l'accessibilité des logements. Au Royaume-Uni [UK95] et en Hollande, les lois et réglementations [Bow03] obligent les responsables de projet à réaliser des bâtiments et habitations accessibles ou facilement adaptables aux besoins des utilisateurs. En Belgique [CWA75] seuls les bâtiments ouverts au public sont soumis à quelques critères (largeur de portes intérieures, etc.). Un collectif belge, le GAMAH [GAM], propose un

outil de mesure de l'accessibilité en fonction des différents types de handicap : l'Indice Passe-partout (IPP) donne une information sur le niveau d'accessibilité des bâtiments représenté par six pictogrammes et six cotations pouvant varier de 0 à 9, pour les personnes handicapées physiques ou sensorielles. Au niveau européen [Eur04], le Conseil de l'Europe incite les pays membres à encourager l'accessibilité des logements, lieux de travail et bâtiments publics en proposant une réflexion sur l'évolution dans la manière de penser les constructions (approche individuelle, approche catégorielle, approche intégrée). Aux États-Unis [Hou88], depuis 1988, le Congrès américain a élargi la notion de discrimination aux pratiques basées sur le handicap, dans le Fair Housing Act, des exigences de design et de construction pour les maisons multifamiliales construites après mars 1991 sont établies. En vertu du code l'American with Disabilities Act [ADA02], tous les opérateurs du bâtiment sont invités à construire des logements accessibles et ils sont tenus de veiller à l'amélioration de l'accessibilité de leurs installations en faisant des travaux de rénovation et de réadaptation. Ces mêmes exigences légales existent en Afrique du Sud [Dis00] et en Australie [Dis92].

3. Notre approche

3.1. Introduction

Nous proposons d'utiliser les potentialités de la réalité virtuelle comme source de données sur l'environnement et comme support de visualisation des résultats de l'évaluation de l'accessibilité d'un appartement ou une maison individuelle. Nous déterminons, pour chaque point de l'espace, s'il est accessible au sens de la manipulation par une personne ayant des caractéristiques physiques propres. Celle-ci est considérée contrainte dans ses limites articulaires de part une déficience physique. D'autre part, nous supposons qu'elle se déplace à l'aide d'un système de mobilité comme un déambulateur ou un fauteuil dont chacun présente des contraintes dont nous tenons compte.

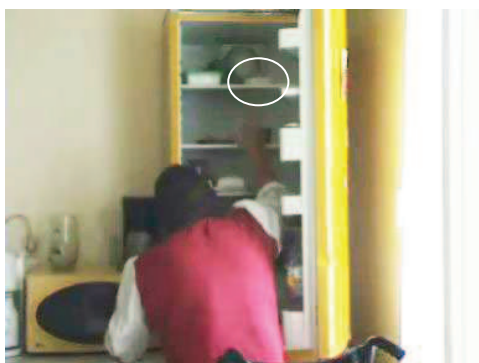


Figure 1 : Exemple illustratif du problème étudié

La figure 1 représente une image instantanée d'une vidéo prise sur internet illustrant le problème de la saisie d'un objet dans un élément de rangement qui est en l'occurrence un réfrigérateur. La personne est assise dans un fauteuil et ses capacités physiques résiduelles l'empêchent d'accéder à l'objet placé sur une étagère qui s'avère trop haute. Cette personne se déplace à l'aide d'un fauteuil manuel et possède des restrictions au niveau des mouvements de l'épaule.

3.2. Position du problème

Le principe général de la méthode que nous proposons consiste à vérifier si une solution à l'inverse cinématique de la structure articulée globale humain et moyen de déplacement existe pour tout point de l'espace que nous désirons évaluer. Notre méthodologie repose sur trois composantes : la personne humaine, l'environnement à évaluer et l'interaction entre les deux.

De manière générale considérons $[X]$, un point de l'espace, défini par sa position et éventuellement son orientation, soit six composantes, d'autre part considérons $[\Theta]$ un vecteur représentant un ensemble de variables articulaires correspondant aux divers degrés de liberté d'une personne humaine. Le point $[X]$ est considéré comme accessible s'il existe une solution à l'équation $f([\Theta])=[X]$. La fonction $f([\Theta])$ représente la relation entre les variables articulaires et les divers éléments du corps humain. Si une solution à cette équation existe alors nous considérons que le point est accessible sans prendre en compte l'aspect confort de la solution. Effectivement, ce système d'équation est hautement redondant ce qui nous amène à trouver une solution parmi un ensemble en restant dans les limites articulaires mais qui, malgré tout, peut ne pas être confortable pour la personne. Par la résolution de ces équations nous obtenons une solution, soit la personne, en réel, utilise une solution plus « confortable » soit elle utilise une solution conforme à nos calculs. En tout état de cause nous savons qu'une solution existe et qu'elle est utilisable dans la limite de ses capacités articulaires. La personne se déplace à l'aide d'un dispositif d'aide tel un fauteuil, manuel ou électrique, ou un déambulateur. Dans le premier cas elle est assise ce qui contraint ses mouvements ou elle est debout dans le second cas ce qui a une incidence sur ses gestes au niveau des points de saisie. Le système d'aide au déplacement possède lui-même des contraintes, à la fois d'encombrement dans le placement et de cinématique dans le mode de déplacement. Les fauteuils sont, en général, non

holonome ce qui impose à la personne de faire des manœuvres. Nous ne considérons pas les aspects de non holonomie puisque nous laissons à la personne l'initiative des manœuvres et l'optimisation du placement devant les objets à saisir dans le même esprit que le choix de la solution de saisie confortable. Par contre, les possibilités de placement du système de déplacement sont prises en considération puisque ceux-ci interviennent dans la possibilité de saisie. Le système d'équation $f([\Theta])=[X]$ permet de vérifier l'accessibilité en considérant que la personne est fixe. Dans le cas d'une mobilité il faut faire intervenir l'espace de déplacement $\phi(x,y,z)$ avec (x,y,z) l'espace de travail. Dans notre approche la composante z est fixe puisque nous considérons que la personne se déplace parallèlement au sol. Les composantes x et y sont définies par le polygone de déplacement du système de mobilité. Le système d'équation à résoudre devient :

$$f([\Theta])=[X]-\phi(x,y,z)$$

3.3. Modélisation du couple humain - aide au déplacement

L'objectif de l'évaluation de l'accessibilité consiste à vérifier si un environnement de vie est adapté à son occupant. Ainsi l'accessibilité est fonction des capacités physiques de la personne vivant dans ces lieux. Il nous faut dans un premier temps évaluer ses capacités afin d'en tenir compte dans l'évaluation. Nous définissons ses potentialités physiques comme étant les limites de chaque articulation qui sont décrites soit par mesures directes soit par un expert connaissant la personne (médecin, rééducateur, ergothérapeute etc...). Il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique de la chaîne articulaire humaine. Nous nous intéressons uniquement à la chaîne allant du bas de la colonne vertébrale vers une main. Nous considérons que la personne est soit assise sur un fauteuil, les membres inférieurs étant inactifs soit s'aide d'un déambulateur et dans ce cas les membres inférieurs sont considérés comme le moyen de déplacement et ne participent pas à la préhension. La bibliographie dans le domaine de la biomécanique propose plusieurs modèles [Lep93][Mau99][Bad99][Kay94]. Nous avons opté pour le modèle à 21 degrés de liberté [Yan004] qui nous paraît le plus précis pour notre application. Comme il a été mentionné plus avant, nous désirons vérifier l'accessibilité en divers points de l'environnement d'une personne munie de son système de déplacement, pour lequel nous avons également besoin d'un modèle. Le couple humain-système de mobilité se déplace sur le sol par trois degrés de liberté : un degré en rotation et deux en translation. Nous obtenons le modèle à 24 degrés de liberté qui est décrit sur la figure 2. Le modèle

mathématique est établi à partir de la multiplication des matrices de Denavit-Hartenberg [Den55].

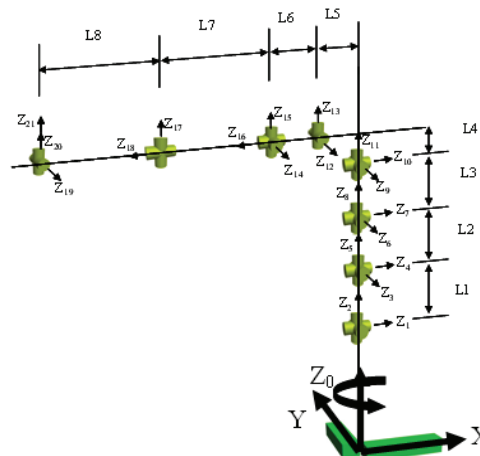


Figure 2 : Le modèle du couple humain-système d'aide au déplacement

3.4. Modélisation de l'environnement

Nous désirons évaluer l'environnement quotidien d'une personne dans l'objectif de l'adapter aux contraintes physiques de son occupant. Nous avons besoin d'une représentation en trois dimensions de cet environnement pour deux raisons, à la fois pour visualiser l'espace de travail réel ou virtuel, avant ou après modification et pour la récupération des coordonnées 3D des différents points pour lesquels nous désirons effectuer l'évaluation.

Plusieurs méthodes sont envisagées dans la littérature dont nous pouvons en citer trois. La première permet de réaliser une mesure directe en utilisant un système de scanning par laser. La deuxième permet la construction 3D par photogrammétrie, cette méthode consiste à associer un ensemble de données 2D afin d'en déterminer les informations 3D. Plusieurs logiciels comme Photomodeler ou Imagemodeler permettent de réaliser ce travail [Kim, 2005]. La troisième méthode consiste à construire l'environnement 3D à partir de logiciels comme 3DStudioMax, Maya ou Blender par exemple pour les plus courants. Dans notre cas nous avons utilisés le logiciel 3dstudioMax qui nous permet de construire des environnements non réels adaptés à nos besoins propres. Nous ne tenons pas compte des objets mobiles comme les meubles les chaises, qui sont facilement déplaçables en cas de besoin. Nous avons travaillé sur un environnement de cuisine qui nous paraît renfermer de nombreux points dont

l'accessibilité n'est pas évidente. La figure 3 reproduit l'environnement de travail.



Figure 3 : L'environnement 3D de travail

3.5. Interaction entre l'environnement et la personne

3.5.1. Introduction

Le principe de base de notre approche consiste à calculer l'existence d'une solution de l'inverse cinématique de la structure articulée pour atteindre un point cible d'un espace modélisée. Un point est considéré comme atteignable si la distance entre l'extrémité de la structure articulée et le point cible est inférieur à une valeur prédéfinie. Nous considérons que la base de la structure articulaire est mobile dans un plan de l'espace et que le volume balayé dépend du caractère de mobilité de la personne modélisée. Si la personne utilise un déambulateur alors la position de la base du référentiel de la structure articulée est située à la taille d'une personne debout et le volume balayé est un cercle de rayon défini. Si la personne est en fauteuil roulant électrique ou manuel alors la position de la base du référentiel de la structure est située à la taille d'une personne assise et le volume balayé est un rectangle. Un point est considéré comme atteignable s'il existe une solution à l'inverse cinématique sans préjuger de la trajectoire à effectuer pour se mettre en position. Ainsi notre objectif consiste à vérifier l'existence d'une solution à l'inverse cinématique en considérant :

- 22 degrés de liberté pour la structure articulée (humain et orientation du système de mobilité) ;
- chaque degré de liberté est contraint par des limites correspondantes aux débattements maximum des articulations ;
- le couple humain-système de mobilité se déplace dans un polygone parallèle au sol (2 degrés de liberté) ;
- il n'est pas pris en considération de caractéristiques particulières comme la minimisation de l'énergie ou le confort du

mouvement. Nous considérons que si une solution existe elle est atteignable par la personne.

- la précision des calculs n'est pas primordiale puisque nous considérons que la compliance du corps humain peut compenser ces erreurs ;

- le temps de calcul doit être rapide afin de pouvoir tester un maximum de point en un minimum de temps.

3.5.2. Inverse cinématique

Le principe général de notre approche consiste à établir l'existence d'une inverse cinématique de notre chaîne articulaire par rapport au point à atteindre. Trois types de méthodes sont disponibles actuellement :

- les méthodes analytiques qui permettent une résolution très rapide du problème. [ToI00] et [Kal07] proposent une méthode limitée en nombre de degrés de liberté et applicable uniquement à la structure articulaire du membre humain supérieur.

- les méthodes de linéarisation constituent une autre solution à notre problème. Elle approche une solution par des incréments successifs en considérant que le système est linéaire autour du point de fonctionnement. Le problème est résolu par inversion d'une matrice Jacobéenne qui est en général singulière ce qui implique de calculer son inverse par des techniques de pseudo inverse dont le coût en temps de calcul est important [Bae01].

- Les méthodes d'optimisation, qui constituent une troisième catégorie, sont les plus intéressantes et souvent utilisées lorsque le nombre de variables est important et si l'on désire obtenir des solutions respectant certains critères particuliers. Le principe consiste à formuler le problème comme un problème d'optimisation par minimisation d'une fonction de coût. De nombreuses approches ont été développées dont on peut citer la descente de gradient avec des adaptations particulières [Muk08][Mul07] et les algorithmes génétiques [Abd04]. Ces algorithmes sont efficaces mais risquent souvent de mener vers des minimums locaux. Ils peuvent être très rapides notamment en utilisant des méthodes de type BFGS [Abd04] qui approximent le calcul de l'inverse matriciel. Dans cette catégorie d'algorithmes nous trouvons l'algorithme Cyclique Coordinate Descent (CCD) [Wan91] basé sur un calcul incrémental des variables de l'extrémité du système articulé vers la base en minimisant l'erreur entre le point (et l'orientation) à atteindre et le point (et l'orientation) réellement atteint. Plusieurs inconvénients sont communément cités dont une adaptation des variables non homogène dans la chaîne articulaire et une lenteur de convergence près de la cible. Lorsqu'aucune limite n'est imposée aux variables alors l'algorithme converge sans minimas locaux. Il est possible d'imposer des limites aux articulations

comme nous le ferons dans notre application, dans ce cas des minimas locaux peuvent survenir.

Dans notre approche nous avons développé un algorithme de résolution de l'inverse cinématique, appelé Algorithme à Approximation Incrémentale (IAA) basé, sur une approche similaire à l'algorithme CCD. Nous modifions cet algorithme en imposant une valeur à chaque variable articulaire de la base vers l'extrémité. La valeur de l'incrément est adaptée en fonction de l'erreur commise afin d'affiner la recherche en approchant de la solution. Ces modifications ont plusieurs effets. Nous avons constaté que notre algorithme est légèrement plus rapide lorsque le point cible est constitué de la position et de l'orientation. Le point essentiel de notre algorithme repose sur la prise en compte du polygone d'évolution dans la boucle de résolution ce que ne permet pas l'algorithme CCD qui a besoin d'un point pour calculer la valeur optimale de l'incrément articulaire. Un étude détaillée du principe théorique est présenté dans [Otm09].

```

1-Initialiser de les variables  $\Theta_i$  de manière aléatoire
2- Faire
3- Définir l'incrément Inc(i) (Incrément par variable articulaire)
4-   Faire pour toutes les variables  $\Theta_i$ 
5-      $\Theta_i = \Theta_i + \text{Inc}(i)$ 
6-     - Calculer la distance entre la position
       courante et le but tel que  $\epsilon = |f([\Theta]) - [X]|$ 
7-     - Si  $(\Delta\epsilon) < 0$  alors garder  $\Theta_i$ 
8-     - Sinon  $\Theta_i = \Theta_i - 2 * \text{Inc}(i)$ 
9-     . Calculer  $\epsilon = |f([\Theta]) - [X]|$ 
10-    . Si  $(\Delta\epsilon < 0)$  alors garder  $\Theta_i$  sin on  $\Theta_i = \Theta_i$ 
      + Inc(i) (garder la valeur d'origine)
11- Tant Que (les conditions d'arrêts ne sont pas vérifiées)

```

L'algorithme IAA

3.5.3. Prise en compte de l'encombrement du mobile.

Notre application nécessite de prendre en compte l'encombrement du mobile puisque selon la forme et la surface au sol, les capacités de préhension sont différentes. Nous nous focalisons sur deux formes du mobile, l'une circulaire et l'autre rectangulaire. La forme du système de mobilité a une influence sur l'ensemble des positions possibles atteignables dans l'espace d'évolution. Le polygone de configuration dont nous tenons compte dans l'algorithme est obtenu en appliquant la différence de Minkowski dont le lecteur trouvera des précisions dans [Loz83]. Il consiste à vérifier s'il existe un ensemble de variables Θ tel que $f([\Theta])$ peut atteindre le point $[X]$ considérant l'espace de mobilité $\phi(x,y,z)$. La position à atteindre ne correspond plus à un point mais une surface. Ainsi la fonction de coût (lignes 6 et 9 dans l'algorithme) devient

$$\epsilon = |f([\Theta]) - [X]| + \phi(x,y,z)$$

4. Résultats

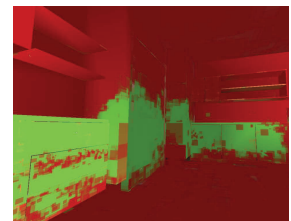
Les aspects théoriques développés dans le cadre de ce travail ont été implantés sous le logiciel Virtools qui permet de manipuler un environnement en 3D. Nous avons développé trois blocs de calculs :

- le premier permet de définir l'espace d'évolution qui est utilisé par l'algorithme IAA pour le calcul du polygone de configuration ;
- le second permet de réaliser le calcul de l'inverse cinématique par IAA ;
- le dernier permet d'acquérir automatiquement les points 3D de l'espace.

Dans la version actuelle nous n'avons pas implanté l'orientation de la saisie. Nous avons conçu une cuisine à partir du logiciel 3DSMax. Le principe de cette implantation consiste à étiqueter chaque point de l'espace par une couleur selon son caractère d'accessibilité ou non. L'étiquetage automatique est réalisé sur 20000 points en 6 mn environ correspondant en moyenne à 18ms par point pour le calcul de l'inverse cinématique et la gestion du graphique. L'erreur admise étant de 1 cm.

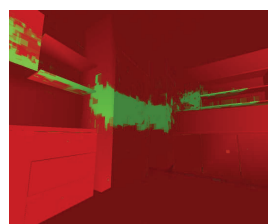


a- en déambulateur

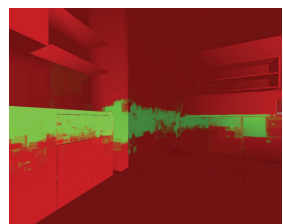


b- en fauteuil

Figure 4 : Etiquetage des points de l'environnement pour une personne sans limitations particulière des articulations



a- en déambulateur



b- en fauteuil

Figure 5 : Etiquetage des points de l'environnement avec limitation des débattements articulaires.

5. Conclusion.

Nous avons proposé dans ce papier une méthode d'évaluation de l'accessibilité d'un environnement bâti en vérifiant l'existence d'une solution à l'inverse cinématique d'une chaîne articulaire constituée par la structure biomécanique d'une personne avec ses limitations propres de

débattements articulaires. La personne se déplace dans l'environnement par l'intermédiaire d'une aide technique qui est soit un déambulateur soit un fauteuil. Le problème posé par l'une ou l'autre aide technique n'est pas le même en terme de contraintes de calcul. Nous tenons compte de chacune des caractéristiques des aides au déplacement. Les perspectives de développement vont dans le sens de la précision du polygone d'évolution. Nous travaillons sur un complément de l'évaluation en définissant les possibilités de mobilité à l'intérieur d'un espace plus vaste et pour y réaliser une opération de préhension. Le principe globale reste le même mais il faut que les divers lieux de l'environnement soit accessibles par le moyen de déplacement.

6. Bibliographie.

- [Abd04] K. Abdel-Malek, W.Yu, J Yang, K. Nebel, "A mathematical method for ergonomic-based design placement", *Int. Journal of Industrial Ergonomics*, pp375-394,2004
- [ADA02]ADA 2002 "American with Disabilities Act (ADA), Accessibility Guidelines for Buildings and Facilities (ADAAG)", as amended through, September 2002
- [Bad99] Badler, N., Palmer, MS, and Bindiganavale, R., (1999). Badler, N., Palmer, MS, et Bindiganavale, R., (1999). "Animation Control for Real-Time Virtual Humans," *Comm. ACM* , Vol. 42, no. 8, pp. 64-73.
- [Bae01] Paolo Baerlocher P, Inverse kinematics techniques for the interactive posture control of articulated figures. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, PhD Thesis, 2001.
- [Bow03] Bowbeshuit 2003, « The Netherlands standard of accessibility Building Regulation Act (Bouwbesluit) ». Amsterdam, the Netherlands (2003), disponible sur le lien www.wetten.nl
- [CWA75] CWATUP 1975, Federal Law of July 1975, Belgium, its implementing decrees of May, 1977 and the Walloon Code for Spatial Planning, Urban Planning and Heritage and Energy (CWATUP).
- [Den55] Denavit, J, RS. Hartenberg, "A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices", *Journal of Applied Mechanics*, vol 77, 1955, pp215-221.
- [Dis00] Discrimination Act,The Parliament of the Republic of South Africa. "The Promotion of Equality and the Prevention of Unfair Discrimination Act. 2000 ». Available at [www.iwraw-ap.org/resources/pdf/South 20Africa_GE1.pdf](http://www.iwraw-ap.org/resources/pdf/South%20Africa_GE1.pdf).
- [Dis92] Discrimination Act,"The Parliament of Australia. Disability Discrimination Act ». 1992. Available at <http://www.austlii.edu.au>.
- [Eur04] Europe 2004,"Accessibility: principles and guidelines. Adaptation of buildings in a built environment accessible », *Council of Europe Publishing*, ISBN 92-871-2259-8, 1993, Reprinted March 2004
- [Gam] GAMAH, « GAMAH Groupe d'Action pour une Meilleure Accessibilité des personnes Handicapées », Région de Wallonie en Belgique, disponible sur le lien <http://www.ipp-online.org/>
- [Hou88] Housing 1988, "Fair Housing Act A federal law", passed in 1968 and amended in 1988

<http://apartments.about.com/od/glossar1/g/fairhousingact.htm>
- [Kal07] M. Kallmann, Analytical inverse kinematics with body posture control, *Computer animation and virtual worlds*, 2007
- [Kay94] Kaysis B., and Iskander PA, "A three-dimensional human model for the IBM/CATIA system," *Computer Aided Design* , Vol. 25, No. 6, pp. 395-397, 1994.
- [Kim05] J. Kim. "Development and Effectiveness of a Virtual Reality Telerehabilitation System for Accessibility Analysis of Built Environment". *PhD thesis*, University of Pittsburgh, 2005.
- [Lep93] Lepoutre, FX, "Human posture modelization as a problem of inverse kinematic of redundant robots", *Robotica* , Vol.. 11, pp. 339-343, 1993
- [Loi05] Loi 2005, « La loi n°2005-102 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées » disponible sur <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000809647&dateTexte=>
- [Loz83] Lozano-Perez T, "Spatial planning : a configuration Space Approach" *IEEE Trans. On Computer*, Vol-C 32, n°2, pp 108-120, (1983)
- [Mau99] Maurel, W., 1999, "3D Modelling of the human upper limb including the biomechanics of joints, muscles and soft tissues », Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse.
- [Muk08] R. Mukundan, A fast Inverse Kinematics Solution for an n-link Joint Chain, 5th Int. Conf. on Information Technology and Applications, pp 349-354, 2008
- [Mul07] R. Muller-Cajar and R. Mukundan. Triangulation: A new algorithm for Inverse Kinematics, *Proc. Image and Vision Computing*, New Zealand, pp 181-186, 2007
- [Otm09] R. Otmani, A. Moussaoui, A. Pruski, "A new approach to indoor accessibility", *International Journal of Smart Home*, Vol.3, No.4, October, 2009
- [Tol00] Tolani D., Goswami A., Badler N. Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs. *Graphical Models*, vol. 62, pp. 353-388, 2000.
- [UK95] UK 1995, The Parliament of U.K. « Disability Discrimination Act. 1995 », disponible sur le lien <http://www.opsi.gov.uk/acts/acts1995/>
- [Wan91] Wang L.T., C.C. Chen, "A combined Optimization Method for Solving the Inverse Kinematics Problem of Mechanical Manipulators", *IEEE Transactions of Robotics and Automation*, Vol 7, N° 4, 1991, pp 489-499.
- [Yan04] Yang J., E.P. Pitarch,"Digital Human Modeling and Virtual Reality for FCS", Technical Report n° VSR-04.02, The University of Iowa, Contract/PR NO.DAAE07-03-D-L003/0001, 2004.