

# État de l'Art

## La Cinématique Inverse Pour l'Animation 3D

Gauthier Bouyjou, Clémence Courdy-Bahsoun, and Sylvain Durand

Université Toulouse III – Paul Sabatier

{gauthier.bouyjou,clemence.courdy-bahsoun,sylvain.durand3}@univ-tlse3.fr  
<http://www.univ-tlse3.fr/>

**Résumé** Ce document est un état de l'art sur l'animation de personnage 3D par cinématique inverse réalisé dans le cadre de l'UE de Travaux d'Initiation à la Recherche. L'animation de squelettes articulés par cinématique inverse est un problème prédominant dans la recherche en animation 3D et en robotique, qui s'oriente de plus en plus vers l'obtention de mouvement réaliste en temps réel. L'objectif étant de définir la ou les méthodes de cinématique intéressante à être intégrées dans un éditeur d'animation 3D afin de faciliter la création d'animation plus ou moins longue pour des modèles pouvant être complexe par les utilisateurs de cet éditeur. Cet état de l'art constitue un recensement non exhaustif de méthodes numériques (matrice Jacobienne, matrice Hésienne exacte,...) et analytiques (CCD, triangulation, FABRIK,...) pour la résolution de cinématique inverse pour l'animation de modèle 3D, ainsi qu'une analyse des avantages et des inconvénients de chacune des méthodes présentées.

**Mots clés** Cinématique Inverse, Méthode Numérique, Méthode Analytique

## 1 Introduction

Dans le cadre de l'UE de projet où on nous demandait de réaliser un éditeur d'animation pour le moteur graphique radium de l'équipe **STORM** de l'Institut de Recherches en Informatique de Toulouse, Loïc Barthe nous proposait de compléter notre projet par la constitution d'un état de l'art sur la problématique de la Cinématique Inverse (**CI**).

La **CI** est un procédé mathématique permettant de mouvoir un squelette articulé d'une position initiale vers une position finale définie sans que l'utilisateur déplace manuellement chaque articulation impliquée dans le mouvement.

Il s'agit d'une problématique inhérente à l'informatique graphique mais également à la robotique. Elle constitue un axe de recherche pondérant dans ces deux domaines depuis la fin des années 80. De nombreuses techniques ont été développées avec des résultats probants, néanmoins le véritable défi de la cinématique inverse est l'obtention d'un solveur fournissant en temps réel un rendu de mouvements réalistes.

Dans l'informatique graphique, et notamment dans le domaine de l'animation 3D, la cinématique inverse est un procédé de calcul dont l'objectif premier est de faciliter l'utilisation des logiciels d'animation par les utilisateurs avec une approche plus intuitive de la mise en mouvement de modèle 3D. En effet les approches par cinématique directe peuvent se montrer fastidieuses à mettre en œuvre pour des projets de taille conséquente. Ainsi l'utilisation d'un solveur de CI dans un logiciel d'animation est une exigence de plus en plus fréquente.

La recherche dans le domaine de la cinématique inverse étant assez active, de nombreux solveurs ont vu le jour ces trentes dernières années. La résolution du problème de cinématique inverse se base sur une approche soit numérique, soit analytique. Longtemps la difficulté principale dans la recherche reposait sur la gestion des contraintes articulaires qui pour plus de simplicité étaient réduites au maximum. En effet, pour pouvoir obtenir un mouvement physiquement conforme à la réalité, la résolution doit tenir compte des contraintes mécaniques représentées par les degrés de liberté articulaire.

Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients, souvent du à des difficultés à trouver un bon compromis entre la qualité du rendu et l'efficacité temporelle pour les méthodes. De ce fait les recherches les plus récentes, en réponse à une demande croissante, explorent des solutions alliant au mieux les propriétés de calcul en temps réel à celles du rendu réaliste.

Dans une optique de documentation poussée, nous avons pu voir en détail un certain nombre de méthodes plus ou moins classiques permettant de résoudre le problème de CI pour des modèles articulés 3D. Chaque méthode développée possèdent généralement des propriétés intéressantes et innovantes par rapport aux méthodes qui les précèdent dans le temps. L'analyse des résultats obtenus par l'application de ces méthodes permet de mettre en évidence l'évolution des moyens utilisés pour procéder à de la cinématique inverse. Bien que les recherches soient axées principalement sur le domaine de l'animation, la plupart des solutions sont étroitement liées au domaine de la robotique.

Dans un premier temps nous présentons un certain nombre de méthodes numériques et analytiques tendant à répondre au mieux à la problématique de génération de mouvements réalistes en temps réel.

Après quoi nous faisons une analyse croisées des différents résultats obtenus pour chacune des méthodes détaillées afin de définir les avantages et les inconvénients de chacun.

## 2 Méthodes numériques

Les solutions obtenues par les méthodes numériques sont le resultat de calculs bruts, la plupart du temps assez complexes et le plus souvent associés à

des coûts de calcul élevés notamment lorsqu'il s'agit d'approche matricielle. Il s'agit de résolution de problème d'optimisation avec ou sans contrainte reposant sur une minimisation du taux d'erreur par moindres carrés. Il est donc nécessaire de modéliser le problème en d'identifier les inconnues, les variables puis de définir les équations à résoudre. Puis par application des moindres carrés adaptés (ordinaire, totaux,...) on peut résoudre numériquement ou matriciellement ces équation en minimisant les erreurs en entrée et/ou en sortie.

La résolution par **Matrice Jacobienne** est l'une des première méthode à avoir vu le jour pour résoudre le problème de CI par une approche numérique.

La résolution classique par Matrice Jacobienne repose par la minimisation des erreurs par moindres carrés ordinaire passant par le calcul de la *pseudo-inverse* (notée  $A^+ = (AA^T)^{-1}$ ) de la matrice Jacobienne. Cependant cette méthode est très coûteuse en temps et présente des limites dans certain cas particulier liées à d'importantes variations.

La méthode de **Jacobienne étendue** [20] a été imaginé notamment pour résoudre les problèmes de grandes variations et également pour réduire le nombre d'itération lors de la résolution. L'idée étant d'augmenter la dimension de la matrice jacobienne pour permettre le calcul de l'inverse classique de la matrice plutôt que celui de sa pseudo-inverse. Néanmoins ce solveur reste très coûteux en temps et impose des rotations dans un seul plan simultanément, ainsi il est peu adapté pour l'animation en temps réel en dépit de resultats plutôt positifs.

La limite principale des différentes méthodes basée sur les matrices Jacobiennes réside dans le calcul de la pseudo-inverse qui n'étant pas une matrice carrée oblige à effectuer des calculs lourd perdant en précision. Cette perte de précision est gérée par une minimisation de l'erreur qui est également coûteuse en temps de calcul. La version étendue de la méthode jacobienne ne constitue pas une version assez satisfaisante car toujours très coûteuse en temps. C'est en poursuivant l'objectif de calcul en temps réel à partir de jacobienne que la méthode par **"semi"-jacobienne** a été développée [6]. De nombreuses solutions pour optimiser le temps de calcul de l'inverse ont été envisagées notamment par décomposition *LU*. C'est une approche qui permettrait de diviser drastiquement le temps de calcul dans certains cas.

En 2011 une **approche par recherche de ligne projetée** a été développée [9]. Il s'agit d'une méthode numérique résolvant le problème de cinématique inverse comme un problème d'optimisation non linéaire contrainte. C'est une méthode simple à mettre en oeuvre et facilement intégrable qui constitue un bon compromis entre temps réel et réalisme (efficacité et robustesse).

La résolution du problème de cinématique inverse par **matrice Hessienne exacte** à longterm a été mise de côté, au profit des méthodes faisant des approximations sur les dérivées d'ordre 2. Cependant des chercheurs en robotiques qui se sont penchées sur le potentiel d'une telle approche ont obtenus des résultats très probants. Ainsi *Kenny Erleben* de l'université de Copenhague et *Sheldon*

*Adreus* de l'École de technologie supérieur de Montréal ont revisités cette approche pour des modèles 3D [10].

Pour rappel une matrice hessienne est une matrice carrée contenant les dérivés partielles de la fonction à résoudre.

Tel que pour la fonction  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ , la matrice hessienne  $H_{ij}(f) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$

La résolution se fait en suivant le processus courant de la résolution de problème d'optimisation avec contrainte par descente de gradient. Dans une matrice Hessienne les redondances, comme on les appelle, se manifestent par des valeurs singulières dans la matrice qui sont traitées par la projection de l'entier positif le plus proche. Les redondances viennent de l'infinité des solutions résultant pour une pose, et représente un réel problème dans la résolution de la cinématique inverse le plus souvent résolu par la recherche de la solution la plus proche de la position précédente dans l'animation.

La hessienne est calculé simplement à l'aide de la jacobienne et du tenseur de troisième ordre qui est un terme longtemps négligé mais indispensable pour calculer la matrice hessienne exacte.

Ainsi on a  $H = J^T J - K : r$ , avec  $r$  le vecteur résiduel de la minimisation de  $f$ . Pour le maintien de l'articulation à la racine du mouvement le vecteur des paramètres articulaires est prolongé par le vecteur de translation de l'os à la racine. Tous les éléments présentés ainsi que d'autres (comme le calcul de l'angle d'Euler) sont nécessaires au calcul de la hessienne pour une résolution du problème de cinématique inverse par optimisation contrainte afin d'obtenir une pose finale contrainte physiquement.

L'approche par **Matrice Hessienne exacte**, [10], fournit des rendus très précis et ce même pour des conditions initiales défavorables.

Cette méthode récemment développée, à défaut de pouvoir être utilisée pour l'intégralité de la chaîne de cinématique inverse d'une animation pour des raisons évidentes de coût, peut être très appréciée ponctuellement pour des mouvements assez complexes pour un gain de précision.

### 3 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques reposent le plus souvent sur des algorithmes appliquant des heuristiques ce qui optimise généralement grandement le temps de calcul pour la génération d'un mouvement.

D'autres méthodes comme la **Cyclic Coordinate Descent (CCD)** ont été développées pour privilégier le temps réel au réalisme [15]. C est une méthode de résolution du problème de CI très utilisée, notamment dans l'industrie du jeu vidéo. Ce penchant peut s'expliquer notamment par la simplicité d'implémentation de ce solveur dont l'algorithme se construit assez naïvement et par son efficacité en

temps de calcul.

Le principe est assez simple : en partant de l'articulation à déplacer, on effectue des rotations os par os (dans un ordre à définir) visant à rapprocher l'articulation à déplacer du point où l'on souhaite la positionner. Ce mécanisme est répété de manière à ce que l'articulation soit suffisamment proche de la position souhaitée (à une tolérance  $\varepsilon$  près).

Cette méthode étant itérative, on a besoin de définir un nombre d'itération maximum pour éviter les boucles infinies dues par exemple à des positions inatteignables.

Il est intéressant de noter que l'ordre choisit pour la mise à jour des os du squelette aura un rôle majeur sur le réalisme des poses obtenues. En effet, les articulations sur lesquelles sont effectuées les rotations en derniers auront tendance à présenter les rotations les plus étendues. C'est un phénomène à prendre en compte si on souhaite par exemple faire marcher un personnage : la majorité du mouvement apparaissant au niveau des pieds, on préférera souvent mettre à jour la position des cuisses et descendre vers les pieds. Au contraire, si on souhaite déplacer la main d'un personnage en direction d'un objet, on aura tendance à préférer commencer par mettre à jour les os de la main afin de limiter les gros déplacement aux niveaux de ceci.

CCD est une méthode qui est très utilisée dans l'industrie du jeux vidéo, ce qui s'explique par les impératifs de rapidité de calcul des mouvements pour la satisfaction des joueurs. Cependant l'évolution des arts numériques repousse toujours plus les limites entre virtuel et réalité. D'abord à la recherche de graphismes toujours plus réalistes pour des consoles et des supports visuels toujours plus performants, **les algorithmes de triangulations** ont vu le jour.

L'approche par une triangulation de la racine articulaire vers l'extrémité [18] en fait partie. Son avantage principal réside dans la contrainte des angles de rotations par des limites généralement inférieures à  $90^\circ$ . Pour des angles supérieurs à  $90^\circ$  l'approche est différente.

Une approche par la racine offre des résultats plus réalistes. De plus les tests ont montrés que pour des modèles complexes l'algorithme de triangulation devient plus performant que la CCD qui va itérer un grand nombre de fois.

Dans un esprit un peu similaire et par soucis d'amélioration des méthodes de triangulation existantes, *Mukudan et Ramakrishnan*, [17], proposent en 2009 un algorithme robuste de triangulation pour résoudre le problème de CI en réduisant considérablement le nombre d'itérations effectuées par l'algorithme pour des cas complexes ou indésirables. Cette approche tient compte des contraintes physiques également en limitant l'angle de rotation articulaire.

L'avantage incontestable de cette version évolutive est que chaque articulation impliquée dans le mouvement est traitée une seule fois pour définir l'angle adéquat de rotation pour le mouvement. De plus elle est tout à fait applicable sur des structures multi-articulaires.

Ainsi le temps d'exécution est plus rapide que pour l'approche par triangulation classique mais également plus adaptable à des modèles multi-jointures. C'est un algorithme de résolution du problème de CI qui a fait ses preuves et qui est utilisé dans des applications graphiques en temps réel.

L'animation d'un personnage 3D peut aussi être synthétisée d'une manière beaucoup plus intuitive, pour un rendu réaliste. En effet, récupérer sur des sujets réel à l'aide de capteurs placés sur des zones clés (telles que les extrémités et le centre de gravité) les données nécessaires pour reproduire le mouvement sur un modèle 3D anatomiquement compatible est un moyen de créer un mouvement artificiel répandu, notamment dans le domaine du cinéma, avec les images de synthèse.

La méthode de CI séquentielle [19] permet justement de reconstruire des mouvements de l'intégralité du corps à l'aide des données de localisation spatiale des poignets, des chevilles, de la tête et du torse. Le positionnement du pelvis, qui constitue la racine de toutes les articulations du corps, permet par la suite de calculer à l'aide d'une méthode de CI hybride l'orientation de la colonne vertébrale, puis les calculs se propage vers les extrémités supérieures et enfin vers les extrémités inférieures.

De plus la méthode intègre une prévention du problème de collision ou de pénétration au niveau du maillage du modèle qui serait physiquement impossible.

Il s'agit d'une méthode permettant de reconstruire les mouvements en temps réel qui présente l'avantage non négligeable d'être également peu coûteuse en mémoire.

Dans un esprit de synthèse de mouvement calqué en temps réel sur des modèles 3D humanoïdes la méthode de cinématique inverse séquentielle [19], ainsi que les méthodes par Jacobienne [20][6], la CCD[15] et la cinématique par triangulation[18][17] obtiennent des résultats insatisfaisants face à la méthode **FABRIK** d'après les tests de performances/réalisme menés [5].

Méthode itérative reposant sur une heuristique, **FABRIK** (**F**orward **A**nd **B**ackward **R**eaching **I**nverse **K**inematics) procède par une mise à jour de chaque jointure par un parcours direct. Le calcul des nouvelles positions articulaire tient compte de la position de chaque articulation dans la pose clé précédente et de la pose finale attendue. Ces calculs sont répétés jusqu'à ce que la position courante soit proche de la position attendue. C'est une méthode simple à implémenter, développé par *Andreas Aristidou* et *Joan Lasenby* [5] qui a l'avantage de tenir compte des contraintes articulaires lors des calculs pour un résultat respectant

assez les limites anatomiques réelles du modèle.

Il s'agit de l'une des premières méthode à proposer un compromis satisfaisant entre rendu réaliste et calcul en temps réel, avec des résultats significativement plus rapides en temps de calcul associés à une meilleure souplesse des mouvements et des postures plus proche de la réalité.

L'un des défis principal de la cinématique inverse est de calculer un mouvement tout en tenant compte des contraintes internes et externes s'appliquant sur le modèle articulé.

La prise en compte des contraintes externes comme l'application de forces extérieurs sur les articulations est plutôt propre à la robotique pour la préservation de l'équilibre du squelette [1].

En animation 3D les recherches se concentre surtout sur la gestion des contraintes internes articulaire inhérentes aux degrés de libertés des articulations. C'est dans cette optique que **le solveur analytique de cinématique inverse à 12 degrés de liberté** a vu le jour [4]. C'est une méthode qui se base sur un découpage du squelette en cinq parties : la tête, le bras droit, le bras gauche, la jambe droite et la jambe gauche. Ainsi pour l'articulation des membres on se trouve avec un degré de liberté totale de 46. Simple à implémenter, cette méthode est rapide pour des degrés de libertés de 12. En effet en diminuant le nombre de degré de liberté de chaque articulation il est plus difficile de représenter les membres et donc le temps de calcul pour résoudre la cinématique inverse est plus élevé.

**La méthode de Kallman** [14] est un solveur de CI qui a été développé dans l'optique de réaliser des actions avec des personnages virtuels autonomes et interactifs. Les solutions obtenus sont très précises, pour ainsi dire exactes car elles sont obtenues par l'association d'interpolation, pour des postures réalistes et de résolution analytique pour le respect des contraintes physique par une recherche itérative de l'angle le plus satisfaisant.

Néanmoins cette méthode n'est pas trop adaptée pour le contrôle poussé de la posture au cours d'un mouvement.

Cette méthode a été développée dans le but de produire des interactions entre des personnages virtuels autonomes, comme par exemple des IA dans les jeux de type RPG et des objets. Elle a l'avantage considérable de fournir des solutions exactes à partir de solveurs analytiques adaptés sans allourdir le temps de calcul du solveur et pour une meilleure précision.

## 4 Améliorations de techniques existantes

Les méthodes présentées précédemment sont des méthodes relativement classiques qui ont fait l'objet d'améliorations au fil des années.

Reposant sur des méthodes itératives existantes de résolution du problème de CI

**le système de cinématique inverse pour membres anthropomorphes**[2] cherche à rendre les solveurs existants plus performant en temps de calcul par une parallélisation du code, mais également meilleurs en terme de rendu en ajoutant des contraintes articulaires inhérentes au modèle qui sont stockées dans un **octree**. Cette dernière amélioration a pour objectif de faciliter le travail des animateurs en leur évitant de saisir manuellement toutes les contraintes pour toutes les articulations, ce qui représente un travail fastidieux pour des modèles 3D complexes.

Toujours dans l'optique de faciliter le travail des infographistes au maximum, la méthode suivante [16] a été intégrée à une interface utilisateur pour la manipulation de modèle 3D. Le calcul du mouvement par cinématique inverse s'effectue en déplaçant les membres d'une position initiale à une position finale avec la souris. La posture et le mouvement générés sont caractérisés par une matrice pondérée afin de faciliter les calculs lors du déplacement qui peuvent rapidement devenir complexes. A cela vient s'ajouter la vitesse de déplacement des articulations avec le respect des contraintes physiques imposées. Ainsi la position est relativement approximative, mais l'utilisateur a simplement à réajuster manuellement la posture pour un rendu plus réaliste.

La problématique du réalisme en temps réel est devenu un réel défi avec l'avènement de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle. Une étude de 2006 menée par l'équipe de *Boulic* sur la meilleure approche de cinématique inverse pour des interactions physiques virtuelles complexes en temps réel conclut que pour des chaînes d'animations il est plus intéressant d'aborder une approche par priorité numérique pour le positionnement avec précision des extrémités en impactant l'intégralité des articulations du membre. Ainsi cette étude suggère qu'il est plus intéressant de développer une technologie capable de fournir une posture satisfaisante dans son ensemble et calculable en temps réel quitte à réajuster manuellement la position [8].

Une étude menée sur la représentation d'avatar 3d sur une base de réalité virtuelle en réseau s'appuyant sur la cinématique inverse pour reconstituer les parties de du modèle qui ne sont pas récupérées par des capteurs sur des sujets tests montre des résultats en temps réel probants par l'utilisation de quaternions [3]. Le nombre restreint des capteurs constitue un réel défi pour la reconstruction réaliste. C'est une méthode simple et abordable qui offrirait la possibilité de créer de générer des avatars réalistes, reproduisant les mouvements d'un individu dans un environnement virtuel, elle présente l'avantage de limiter le nombre de capteur grâce à l'approche par cinématique inverse.

Pour un certain nombre de solveurs classiques, la résolution de mouvements complexes ou singuliers, peut être un véritable problème. Les travaux de *Baerlocher, Paolo, Boulic et Ronan* [7] sur la résolution de CI par une matrice d'inversion tenant compte des contraintes repose sur deux approches différentes. L'une



des deux approches repose sur une pondération de la matrice inverse et est utilisé en animation, la seconde est plutôt orientée vers la robotique. Néanmoins ce genre de système nécessite une paramétrisation poussée des contraintes pour l'obtention d'un rendu réaliste.

Toujours dans un esprit de simplification du travail des animateurs et dans l'optique d'améliorer les systèmes interactifs, en 2001 une amélioration du système **“Verbs & Adverbs”** a été imaginée [13].

L'amélioration se décrit par une approche d'interpolation utilisant des fonctions à bases cardinales offrant un gain de temps considérable en comparaison à la méthode initiale. Cette méthode intègre également un processus d'apprentissage des données pour un rendu plus réaliste.

La montée de l'**Intelligence Artificielle** au cours des dernières années a aussi eu un impact non négligeable sur la recherche en cinématique inverse. En effet l'apprentissage automatique est une branche de l'intelligence artificielle qui a fait ses preuves dans de nombreux domaines du numérique. Aussi dans un soucis de réalisme toujours plus grand, des chercheurs ont pensés à utiliser l'apprentissage automatique dans des solveurs du problème de cinématique inverse. C'est notamment le cas de *Ho et son équipe* en 2013 [11], ou encore de *Huang et son équipe* en 2017 [12].

De manière générale le concept est relativement simple : à partir d'une base d'apprentissage contenant des postures de références on cherche à partir de la solution calculée par cinématique inverse quelle est la posture référencée qui s'approche le plus de celle attendue. Ainsi la posture finale est définie par une posture référencée permettant d'obtenir un rendu réaliste.

La constitution de la base d'apprentissage par l'équipe de *Ho* se fait par un ensemble de postures 3D construit à partir de postures réelles réalisées avec des capteurs. Ainsi une **Analyse en Composante Principale** optimisée permet d'obtenir une posture répondant aux contraintes à la fois anatomiques et d'intégrités du maillage. Cette opération est répétée jusqu'à obtention de la posture finale attendue. Cette méthode a fait ses preuves également sur l'interaction entre un personnage et des objets.

La méthode développée par *Haung et son équipe*, aussi appelé **Cinématique Inverse par Distribution Gaussienne Multivariée** utilise l'algorithme des k-medoids pour rechercher la plus petite distance entre chaque postures et les postures de la base d'apprentissage. La résolution se fait ensuite par la méthode Jacobienne classique parallélisée.

A l'instar de la méthode de CI conduite par des données sensible à la topologie [11], la plupart des méthodes incluant de l'apprentissage automatique ont de bons résultats en terme de réalisme dépendant directement de la richesse de la base d'apprentissage utilisé. C'est à dire que pour une base d'apprentissage pauvre, avec peu de postures de références enregistrées ou avec des postures de références n'étant pas assez variées les solutions obtenues peuvent rapidement devenir insatisfaisantes et éloignées de la solution attendue.

En terme de performance en temps de calcul, ce type de méthode, comme la méthode par **Distribution Gaussienne Multivariée** [12] met en évidence que le temps de calcul dépend grandement de la méthode de résolution de CI sous-jacente. En effet, cette méthode a largement fait ses preuves en terme de rendu réaliste grâce à l'utilisation d'apprentissage automatique, mais au delà de cette propriété les calculs de cinématique inverse s'effectuent en temps réel grâce à l'utilisation d'une approche par **Jacobienne parallélisée**. Ainsi cette méthode qui a été développée de façon à être facilement intégrable dans les pipeline d'animation 3D est à ce jour la méthode proposant un des meilleurs rapport entre réalisme et calcul temps réel.

## 5 Conclusion

La cinématique inverse qui est un problème inhérent au domaine de l'informatique graphique, notamment en animation 3D, mais également à la robotique cherche à prédire le mouvement entre deux positions clés d'un squelette articulé avec des résultats à la fois réalistes et peu coûteux en temps de calcul.

Ce document présente quelques méthodes de résolutions plus ou moins classiques.

Des solveurs numériques (matrices Jacobiennes, matrice hessienne exacte), analytiques (CCD, FABRIK,...), mais aussi des solveurs constituant une amélioration de solveurs existant comme la méthode de Distribution Gaussienne Multivariée faisant appel à de la reconnaissance par apprentissage automatique des postures sont présentées dans ce document de sorte à mettre en évidence leurs apports et leurs limites dans la résolution de la cinématique inverse.

Après une analyse croisée des résultats en temps de calcul et en précision de rendu des différentes méthodes permet de rendre compte des résultats très encourageants obtenus par les chercheurs ces trentes dernières années.

Cet état de l'art présente de manière non exhaustive un certain nombre de solveurs de cinématique inverse, plus ou moins complexes à mettre en oeuvre possédant chacun ses propres forces et faiblesses.

À ce jour le générateur d'animation que nous proposons permet de créer des animations par une approche de cinématique classique, c'est à dire en déplaçant manuellement chaque articulation ce qui constitue un travail fastidieux pour des animations longues et/ou complexes.

L'intérêt d'une telle investigation est, dans notre cas, d'offrir un recensement intéressant des méthodes afin d'envisager par la suite de développer une fonctionnalité dans le moteur graphique Radium permettant de générer des animations par le procédé de cinématique inverse dans le but de simplifier l'utilisation du générateur d'animation créé par nos soins.

Actuellement la méthode FABRIK est d'après nous une bonne candidate pour ce travail de part ses résultats satisfaisant en temps et en précision.

Cependant d'autres méthodes sont aussi intéressantes, notamment la méthode de Distribution par Gaussienne Multivarié qui demande une résolution par jacobienne classique, une méthode fondamentale de la résolution du problème de cinématique inverse et une amélioration du rendu par apprentissage automatique sur des postures de références. C'est une méthode longue à mettre en place notamment par la constitution d'une base d'apprentissage de positions de référence qui se doit d'être riche.

Néanmoins quelque soit la méthode envisagée il sera nécessaire au préalable d'ajouter dans le plugin d'animation du moteur une gestion des contraintes articulaires.

## Références

1. Inverse kinematics techniques of the interactive posture control of articulated figures - Infoscience, [https://infoscience.epfl.ch/record/32859/files/EPFL\\_TH2383.pdf](https://infoscience.epfl.ch/record/32859/files/EPFL_TH2383.pdf)
2. Inverse kinematics using dynamic joint parameters : inverse kinematics animation synthesis learnt from sub-divided motion micro-segments | Request PDF. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s00371-016-1297-x>, [https://www.researchgate.net/publication/305895660\\_Inverse\\_kinematics\\_using\\_dynamic\\_joint\\_parameters\\_inverse\\_kinematics\\_animation\\_synthesis\\_learnt\\_from\\_sub-divided\\_motion\\_micro-segments](https://www.researchgate.net/publication/305895660_Inverse_kinematics_using_dynamic_joint_parameters_inverse_kinematics_animation_synthesis_learnt_from_sub-divided_motion_micro-segments)
3. (PDF) 3d Animation of Telecollaborative Anthropomorphic Avatars. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1145/501317.501346>, [https://www.researchgate.net/publication/220425912\\_3D\\_Animation\\_of\\_Telecollaborative\\_Anthropomorphic\\_Avatars](https://www.researchgate.net/publication/220425912_3D_Animation_of_Telecollaborative_Anthropomorphic_Avatars)
4. (PDF) A 12-DOF analytic inverse kinematics solver for human motion control, [https://www.researchgate.net/publication/228694625\\_A-12-DOF\\_analytic\\_inverse\\_kinematics\\_solver\\_for\\_human\\_motion\\_control](https://www.researchgate.net/publication/228694625_A-12-DOF_analytic_inverse_kinematics_solver_for_human_motion_control)
5. (PDF) Inverse Kinematics : a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver, [https://www.researchgate.net/publication/273166356\\_Inverse\\_Kinematics\\_a\\_review\\_of\\_existing\\_techniques\\_and\\_introduction\\_of\\_a\\_new\\_fast\\_iterative\\_solver](https://www.researchgate.net/publication/273166356_Inverse_Kinematics_a_review_of_existing_techniques_and_introduction_of_a_new_fast_iterative_solver)
6. (PDF) Using a half-jacobian for real-time inverse kinematics, [https://www.researchgate.net/publication/228988431\\_Using\\_a\\_half-jacobian\\_for\\_real-time\\_inverse\\_kinematics](https://www.researchgate.net/publication/228988431_Using_a_half-jacobian_for_real-time_inverse_kinematics)
7. Baerlocher, P., Boulic, R. : An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels. *The Visual Computer* **20**(6), 402–417 (Aug 2004). <https://doi.org/10.1007/s00371-004-0244-4>, <https://doi.org/10.1007/s00371-004-0244-4>
8. Boulic, R., Varona, J., Unzueta, L., Peinado, M., Suescun, A., Perales, F. : Evaluation of on-line analytic and numeric inverse kinematics approaches driven by partial vision input. *Virtual Reality* **10**(1), 48–61 (May 2006). <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0024-8>, <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0024-8>
9. Engell-Nørregård, M., Erleben, K. : A projected back-tracking line-search for constrained interactive inverse kinematics. *Computers & Graphics* **35**(2), 288–298 (Apr 2011). <https://doi.org/10.1016/j.cag.2010.12.011>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849310002098>
10. Erleben, K., Andrews, S. : Solving inverse kinematics using exact Hessian matrices. *Computers & Graphics* **78**, 1–11 (Feb 2019). <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.10.012>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849318301730>
11. Ho, E.S.L., Shum, H.P.H., Cheung, Y.m., Yuen, P.C. : Topology Aware Data-Driven Inverse Kinematics. *Computer Graphics Forum* **32**(7), 61–70 (2013). <https://doi.org/10.1111/cgf.12212>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cgf.12212>

12. Huang, J., Wang, Q., Fratarcangeli, M., Yan, K., Pelachaud, C. : Multi-Variate Gaussian-Based Inverse Kinematics. *Computer Graphics Forum* **36**(8), 418–428 (Dec 2017). <https://doi.org/10.1111/cgf.13089>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cgf.13089>
13. Iii, C.F.R., Sloan, P.P.J., Cohen, M.F. : Artist-Directed Inverse-Kinematics Using Radial Basis Function Interpolation. *Computer Graphics Forum* **20**(3), 239–250 (Sep 2001). <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00516>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-8659.00516>
14. Kallmann, M. : Analytical inverse kinematics with body posture control. *Computer Animation and Virtual Worlds* **19**(2), 79–91 (2008). <https://doi.org/10.1002/cav.176>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cav.176>
15. Kenwright, B. : Inverse Kinematics – Cyclic Coordinate Descent (CCD). *Journal of Graphics Tools* **16**(4), 177–217 (Oct 2012). <https://doi.org/10.1080/2165347X.2013.823362>, <https://doi.org/10.1080/2165347X.2013.823362>
16. Komura, T., Kuroda, A., Kudoh, S., Shinagawa, a.Y. : An inverse kinematics method for 3d figures with motion data. In : *Proceedings Computer Graphics International 2003*. pp. 266–271 (Jul 2003). <https://doi.org/10.1109/CGI.2003.1214480>
17. Mukundan, R. : A robust inverse kinematics algorithm for animating a joint chain. *IJCAT* **34**, 303–308 (2009). <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2009.024084>
18. Song, W., Hu, G. : A Fast Inverse Kinematics Algorithm for Joint Animation. *Procedia Engineering* **24**, 350–354 (Jan 2011). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2655>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581105507X>
19. Unzueta, L., Peinado, M., Boulic, R., Suescun, : Full-body performance animation with Sequential Inverse Kinematics. *Graphical Models* **70**(5), 87–104 (Sep 2008). <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2008.03.002>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1524070308000040>
20. Šoch, M., Lórencz, R. : Solving Inverse Kinematics – A New Approach to the Extended Jacobian Technique. *Acta Polytechnica* **45**(2) (Jan 2005). <https://doi.org/10.14311/680>, <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/680>