

Une approche implicite pour la modélisation de couches de vêtements

Thomas Buffet^{1,2}, Damien Rohmer¹, Marie-Paule Cani¹

¹LIX, École Polytechnique, CNRS ²Inria Rhône-Alpes

Résumé

Animer des vêtements superposés est difficile à cause des collisions entre les couches en contact sur de grandes surfaces, qui doivent de surcroît se plisser pour maintenir leur isométrie. Le but de notre travail est de représenter chaque couche de vêtements par une surface implicite, puis de mélanger les champs associés à l'aide d'un opérateur qui modélise les interactions statiques entre couches et corrige les intersections.

Notre solution se base sur l'utilisation de plusieurs isosurfaces de champs scalaires pour approximer le corps et les vêtements. La modélisation des plis de ces derniers est directement intégrée dans ce modèle volumique grâce à des déformeurs du champ. Les opérateurs de mélange que nous présentons permettent ensuite la correction des intersections éventuelles, en prenant en compte l'influence relative de chacun des vêtements sur les autres. Cette influence dépend dans notre modèle d'un paramètre modélisant la rigidité relative des tissus. Nous validons cette approche dans un cas d'école en 2D et montrons de premiers résultats 3D.

Résumé

Animating layers of garments remains a challenge due to collisions between layers, the latter being at very close distance from each other and often in contact over large surface areas. The complex folding behavior of each cloth layer in response to lateral compression also has to be modeled. We aim at correcting the possible intersections between layers of superposed garments using a specific operator which models static interaction between clothes. Our solution is based on the approximation of the human body and of each garment by an implicit surface, ie. an iso-surface of a scalar field function. We introduce so called "implicit folds" into those fields to deform them and to model the folding behavior of cloth layers. We also present our combination operator which is able to correct possible intersections between layers while modeling the relative influence of each of them during this correction. This is done thanks to a parameter modeling relative rigidity of cloth layers. We validate this approach over some basic 2D examples and then show our first 3D results.

Mots-clés : Animation de vêtements, surfaces implicites, combinaison de champs scalaires

1. Introduction

L'animation des vêtements virtuels est un sujet important en informatique graphique. En effet, que ce soit pour des applications au jeu vidéo ou au cinéma d'animation, un besoin toujours plus grand en réalisme et en performance se fait sentir, et habiller les personnages avec des vêtements plausibles est important tant d'un point de vue esthétique que narratif.

Dans le monde réel, les vêtements sont portés par couches successives (ex. T-shirt sous un pull, robe à volants portée sous un manteau, etc). Bien que de nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années dans le domaine de la simulation de vêtements virtuels, animer de manière rapide et robuste ces couches successives de vêtements reste un challenge. En effet, les modèles classiques de gestion de collisions considèrent généralement l'interaction entre une surface (le vêtement), et un volume (le corps), mais sont moins bien adaptés à la gestion de collisions entre surfaces. Le cas de couches de vêtements superposés constitue un cas ex-

trême pour cette gestion de collisions, à savoir une série de surfaces en contact sur une grande partie de leur domaine. De plus, ces surfaces doivent se déformer géométriquement de manière isométrique, c'est à dire en créant des plis, de par la nature quasi-incompressible des tissus.

Pour éviter la complexité associée à la simulation de couches de vêtements superposées dans les productions 3D actuelles, il est courant de soit simuler itérativement chaque couche, de la plus proche du corps à la plus éloignée, en représentant alors la couche sous-jacente comme un volume rigide de collision, soit de ne pas modéliser du tout les couches sous-jacentes non visibles. Dans les deux cas, l'interaction bi-directionnelle entre couches de vêtements, dépendant typiquement de l'épaisseur relative des tissus et/ou de la rigidité en flexion des différents matériaux (cuit, laine, tissus, etc), n'est pas prise en compte.

Nous proposons une nouvelle méthode permettant, dans le cas d'animations quasi statiques (succession d'états d'équilibres), de gérer de manière robuste les contacts entre couches de vêtements en tenant compte de l'épaisseur relative des couches, ainsi que de prendre en compte des plis du tissu lors de la déformation. Nous modélisons chacune des couches de vêtement comme une surface implicite, c'est-à-dire comme l'isosurface d'un champ scalaire volumique, et proposons la gestion des collisions via un nouvel opérateur de combinaison entre champs scalaires. Cet opérateur est paramétré par l'influence relative d'une couche sur l'autre. Enfin, nous modélisons les plis du vêtement, modélisant le comportement incompressible du tissu, en tant que déformeur directement intégré dans le champ scalaire associé.

2. Etat de l'art

2.1. Simulation de vêtements

L'un des moyens les plus utilisés pour l'animation de vêtements consiste à réaliser une simulation physique. Trois grandes approches ont été proposées. Premièrement, la modélisation du vêtement comme un continuum discrétisé par éléments finis ou différences finies, introduite par [TPBF87], et utilisée pour les tissus par exemple par [CYTT92] et [EDC96].

Deuxièmement, une approche énergétique couplée à une formulation lagrangienne est utilisée sur un système de particules discrets dans [BHW94] pour améliorer les temps de calcul, puis amélioré dans [EWS96]. Troisièmement, la méthode introduite dans [VCMT95], qui utilise plutôt une formulation Newtonienne, est celle qui a été la plus utilisée et améliorée, notamment en conjonction avec des systèmes masses-ressorts ([IP96], [BFA02], [BMF03], [TPN*13] [LBOK13]). Ce modèle à l'avantage de pouvoir modéliser simplement différentes directions de compressions à l'aide de différents types de ressorts, et ainsi donc de faire apparaître des plis plausibles malgré la simplicité du modèle ([CK05]). Cependant, il s'applique essentiellement à des

maillages rectangulaires et se généralise difficilement à des maillages triangulaires quelconques. Les simulations physiques nécessitent aussi un schéma d'intégration robuste pour éviter les instabilités dues à l'intégration numérique tel que proposé par [BW98].

Les approches par simulation physique possèdent deux inconvénients principaux. Premièrement, elles sont associées à une intégration numérique temporelle ayant un coût en temps de calcul élevé. Deuxièmement, elles nécessitent pour l'utilisateur le choix de paramètres dont l'influence sur le résultat final peut être difficile à prévoir (ex. amortissement, raideur de ressorts en flexion, module de Young, etc).

[MHHR07] et [MMC16] se basent sur l'approche «point based dynamics» pour simuler des vêtements, assurant une stabilité inconditionnelle ainsi qu'un temps relativement faible de calcul, au prix d'une perte de réalisme physique de la simulation.

Des approches basées données telles que proposées par [CMT05], [KKN*13] ou [HEW17], permettent d'animer en temps réel des vêtements plissés à partir d'exemples pré-calculées.

De plus, des approches purement géométriques, telles que [RPC*10] ou [WHRO10], permettent, en partant d'une surface à faible résolution, d'ajouter des détails post-simulations améliorant l'apparence visuelle de l'incompressibilité des tissus.

2.2. Gestion de collision

Il est commun de séparer les méthodes de détection et de gestion des collisions. La détection s'effectue en deux phases : une phase «grossière» au cours de laquelle des candidats «trivialement» non en collision sont identifiés et écartés, puis une phase plus précise permettant de traiter les autres cas. [YKH*10] et [TKH*05] font un état de l'art précis de ces méthodes. Dans le cas des vêtements, leur aspect déformable augmente considérablement la complexité du problème par rapport à des objets rigides. Il est donc nécessaire de développer des algorithmes spécifiques. Dans [BFA02], une méthode de gestion de collision entre tissu et solide est présentée et génère des résultats plausibles au prix d'un lourd calcul. La gestion des collisions entre différentes couches ou plis de vêtements, plus souvent évoqué comme "Démêlement", est traitée en suivant l'historique du vêtement à partir d'un état de départ sans interpénétration dans [SSIF09], par la résolution d'un problème d'optimisation dans [VMT06], ou par un ensemble de contraintes dans [OTSG09].

Plus récemment, les Air Meshes [MCKM15] unifient la détection et la gestion des collisions entre les objets d'une scène, en segmentant le volume entre les objets en tétraèdres, et en assurant que ces tétraèdres ne s'inversent pas au cours du mouvement. Cette méthode s'applique d'autant

mieux aux vêtements superposés que ceux-ci ne glissent que très peu les uns sur les autres. [TWT*16] propose une gestion de collision sur GPU, permettant des résultats rapides et plausibles sur des simulations physiques de vêtements.

Une autre méthode de détection et de gestion des collisions s'appuie sur la représentation implicite des surfaces ou des volumes que nous détaillerons plus bas.

2.3. Modélisation implicite

Etant donné un champ scalaire f , on appelle v -isoniveau du champ f l'ensemble des points $p \in R^3$ tel que $f(p) = v$. Un tel isoniveau peut permettre de représenter une surface dans R^3 , communément appelée surface implicite. Une manière de créer et de contrôler de telles surfaces est de composer une fonction distance générée par rapport à un point, une courbe, ou une surface, avec une fonction lisse, comme par exemple une gaussienne ([BW90]). À la convention près, l'intérieur du volume délimité par la surface peut alors être défini de manière équivalente par $f(p) \leq v$. Cette propriété peut être utilisée pour détecter que l'on se trouve dans un volume et ainsi faciliter la détection de collision avec la surface associée.

De nombreux travaux ont concerné la mise au point de méthode de combinaison des champs scalaires, pour mélanger ou faire interagir les surfaces implicites correspondantes. Outre l'opérateur addition, qui offre un mélange lisse mais n'offre aucun contrôle, certains opérateurs présentent un angle d'ouverture permettant de contrôler différents intermédiaires entre mélange et union des formes [BGC01], tandis que d'autres choisissent cet angle d'ouverture en fonction de l'angle local entre les gradients des surfaces à mélanger, permettant d'éviter les mélanges indésirables [GBC*13]. D'autres opérateurs ont été mis au point pour modéliser les collisions entre surfaces implicites [Can93] et adaptés pour modéliser les contacts entre différentes parties de la peau d'un personnage [VGB*14]. C'est dans la lignée de ces travaux que notre travail se situe, notre but étant de définir un opérateur de combinaison de champs scalaires permettant de modéliser les surfaces de contact entre les couches de vêtements portés par un personnage.

3. Méthodologie générale

Considérons dans un premier temps deux surfaces maillées en entrée représentant deux couches de vêtement sur un individu à un instant donné (le cas de plus de deux couches sera discuté en fin d'article). Si ces maillages sont en interpénétration, notre objectif est de les déformer localement pour produire en sortie deux nouveaux maillages sans collision, de manière à ce que l'influence d'une couche de vêtement sur l'autre - liée à l'épaisseur relative des tissus - puisse être paramétrable, et tel que les distances le long de chaque maillage soient préservées par rapport aux distances avant déformation (isométrie permettant de former des plis). Le pipeline de notre approche est illustré en Figure 1.

Les surfaces maillées peuvent être générées par différentes approches, typiquement par simulation physique ou par skinning. Dans notre implémentation, nous générons nos exemples par *Dual-Quaternion Skinning* (DQS) à partir de la déformation du personnage sous-jacent. On notera que cette approche est couramment utilisée dans les productions 3D afin d'animer des vêtements proches du corps. Dans tous les cas, animer plusieurs couches de vêtements de manière indépendante aboutit à la génération de collisions entre celles-ci. À la place d'utiliser une approche de détection de collision directement entre surfaces triangulées - pouvant être associée à des artefacts visuels liés à des seuils de tolérances trop élevés, et ne prenant pas nativement en compte l'influence d'une couche de tissu sur l'autre - nous modélisons ces maillages en tant que surfaces implicites. Plus précisément, un champ scalaire est calculé pour chaque vêtement tel que son 0-isoniveau approche le maillage. Nous appliquons ensuite un opérateur spécifique sur chacun des champs, et donc des couches. Chaque opérateur va combiner les deux champs précédemment obtenus, pour créer un nouveau champ représentant le même vêtement après déformation, c'est à dire tel que l'intersection soit remplacée par une situation de contact avec l'autre couche.

Ces deux opérateurs sont paramétrés par la rigidité relative des deux vêtements, de telle sorte que dans la situation de contact (après correction des pénétrations), chaque vêtement aura eu une influence plus ou moins élevée sur l'autre.

Nous ajoutons par la suite des plis modélisés directement dans le champ scalaire de manière similaire à l'approche [RPC*10] afin de modifier localement la forme des surfaces implicites et corriger d'éventuelles compressions de longueur introduites par la déformation lors de l'utilisation de l'opérateur, ou même déjà présents dans les maillages en entrée.

Finalement, les sommets de la surface original sont projetés sur leurs surfaces implicites respectives afin d'obtenir en sortie des surfaces triangulées. Cette projection suit l'approche proposée par Vaillant *et al.* [VGB*14], et consiste à déplacer itérativement les sommets du maillage original le long du gradient du champ scalaire jusqu'à son 0-isoniveau. Dans un second temps, une relaxation tangentielle de la surface basée sur l'approche "As-rigid-as-possible" [ACOL00] est appliquée permet de limiter les compressions et extensions dues à la projection.

4. Approximation implicite des vêtements

Comme indiqué précédemment, la première étape de notre approche consiste à modéliser les surfaces maillées - représentant les couches de vêtements en collisions - par des surfaces implicites. Inspirée de l'approche décrite dans Vaillant *et al.* [VGB*14], notre approche se base sur l'utilisation des fonctions à bases radiales de Hermite (HRBF) [Wen04], [MGV11]. L'algorithme prend en entrée un ensemble de points et les normales échantillonnées sur

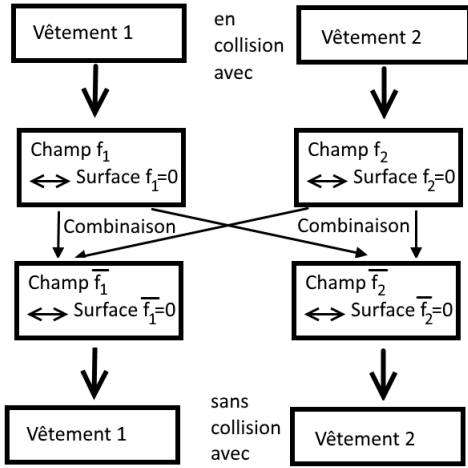


Figure 1: Le pipeline de notre méthode. En entrée, nous prenons des maillages de vêtements en collision l'un avec l'autre - et donc s'intersectant. Nous fournissons en sortie des maillages de ces vêtements en situation de contact. Nous passons par une conversion de ces maillages en surface implicite.

la surface à approximer, et calcule un champ F dont la surface implicite définie par $F(X) = 0$ passe par chacun de ces points de tel sorte que le gradient du champ en ces points, c-a-d la normale de la surface implicite, soit égale aux normales des points d'entrées. Notons que ces surfaces implicites sont nécessairement fermées, et définissent naturellement un intérieur - contenant typiquement le corps du personnage - et un extérieur. Les zones ouvertes sur la surface d'origine, telles que les manches, sont arbitrairement comblées, mais n'entre pas en compte pour le reste de l'algorithme. Le champ scalaire résultant vaut 0 à la surface du vêtement, décroît vers des valeurs négatives à l'intérieur du volume, et croît vers l'infini à l'extérieur. On peut cependant noter que la réponse à la collision entre couches de vêtements n'a lieu que dans un voisinage de leurs surfaces respectives. On s'intéressera ainsi aux valeurs de champs $f_i(X) \in [-1, 1]$, et on considèrera que tout point X tel que $|f_i(X)| > 1$ est éloigné du vêtement.

5. Opérateurs de contact entre couches de vêtements

Étant donné deux surfaces implicites possédant des intersections, nous cherchons désormais à remplacer ces intersections par une modélisation du contact via des déformations locales. La Figure 2 illustre cette situation : deux surfaces définies chacune par une équation implicite, respectivement $f_1(X) = 0$ et $f_2(X) = 0$ sont en collision. Les opérateurs introduits ci-après permettent la création de deux champs implicites, respectivement $\bar{f}_1$ et $\bar{f}_2$ dont les 0 iso-surfaces sont cette fois-ci en contact et non plus en

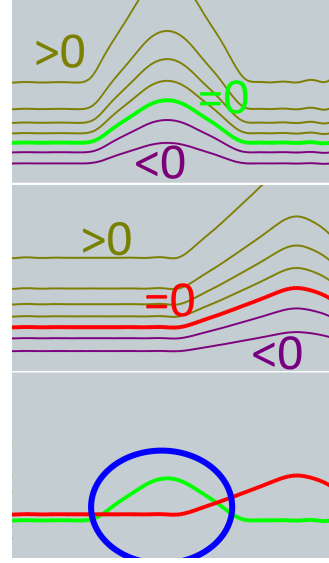


Figure 2: Deux champs f_1 (en haut) et f_2 (au milieu) définissent deux 0-isoniveaux séparant les valeurs positives des champs de leur valeurs négatives. En bas, les deux iso-contours sont tracés en même temps, et se retrouvent en intersection.

collision.

Nous introduisons les opérateurs $\mathcal{O}_1$ et $\mathcal{O}_2$, fonctions lisses de $R^2 \rightarrow R$, tels que $\forall X, \bar{f}_1(X) = \mathcal{O}_1(f_1(X), f_2(X))$ et $\bar{f}_2(X) = \mathcal{O}_2(f_1(X), f_2(X))$. $\mathcal{O}_1$ et $\mathcal{O}_2$ tel que f_1 soit associé à la couche inférieure du vêtement, et f_2 à la couche supérieure. Considérons les contraintes que ces opérateurs doivent respecter. Si le point X est éloigné d'une zone de collision, alors le champ associé à l'une ou l'autre des surfaces est supérieur à 1 (resp. inférieur à -1), et l'opérateur ne doit pas modifier la valeur associée à la surface la plus proche. Cette contrainte se traduit par les conditions aux bords (en simplifiant l'écriture $f_i(X)$ par f_i lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté)

$$\mathcal{O}_1(f_1, -1) = f_1 \quad , \quad \mathcal{O}_2(1, f_2) = f_2 \quad .$$

Nous ajoutons également la contrainte de préservation des 0 isoniveaux dans les zones sans collisions pouvant se traduire par

$$\forall f_2 < 0, \mathcal{O}_1(0, f_2) = 0 \quad , \quad \forall f_1 > 0, \mathcal{O}_2(f_1, 0) = 0 \quad .$$

Comme illustré en Figure 3, cette contrainte est complétée dans la zone $(f_1 < 0, f_2 > 0)$ par un segment sur lequel $\mathcal{O}_i(f_1, f_2) = 0$. L'orientation de ce segment dépend de la rigidité relative de chaque surface. En pratique, plus la surface 1 (resp. 2) est rigide par rapport à la surface 2 (resp. 1), plus l'angle θ associé à ce segment sera proche de 0 (resp.

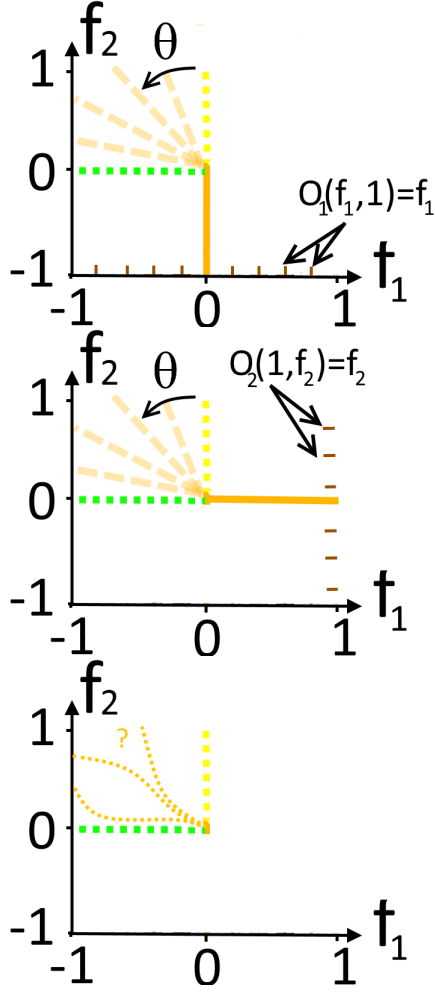


Figure 3: Illustration des contraintes imposées à nos opérateurs dans l'espace (f_1, f_2) . En haut, les contraintes pour O_1 . Au milieu, les contraintes pour O_2 . Pour ces deux images, les contraintes marrons sont les contraintes au bord, et la contrainte orange est la contrainte pour la 0-isosurface. Dans notre modèle, la deuxième partie de la contrainte est un segment pivotant entre deux extrêmes (jaune et vert pointillé), paramétré par l'angle θ qui dépend des rigidités relatives des deux surfaces. En bas, illustration de ce à quoi pourrait ressembler la dernière contrainte en cas d'un choix plus complexe que le notre.

de $\frac{\pi}{2}$), et plus la surface de contact engendrée par l'opérateur correspondra à la surface 1 (resp. 2) sans déformation.

Ces opérateurs ne possèdent pas nécessaire de formes analytiques simples à déduire de ces contraintes. Nous calculons ceux-ci par une résolution numérique de l'équation différentielle de diffusion $\Delta \mathcal{O} = 0$ sur une grille, en tenant compte

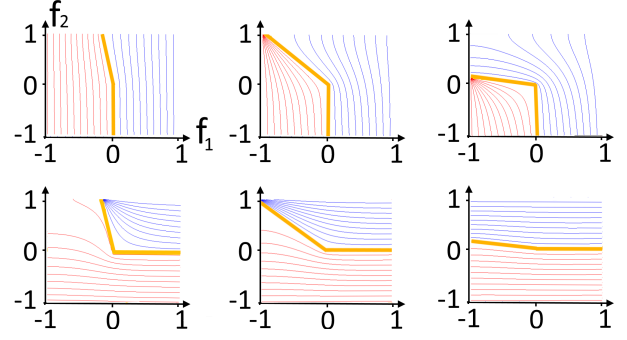


Figure 4: Les opérateurs que nous avons créés. Première ligne : les opérateurs créant le champ $\bar{f}_1$. Deuxième ligne, les opérateurs créant le champ $\bar{f}_2$. On a fait varier le paramètre de rigidité relative de gauche à droite. La partie inférieure droite du profil reste le même que ce soit pour O_1 ou O_2 , ce qui assure le contact des surfaces implicites résultantes.

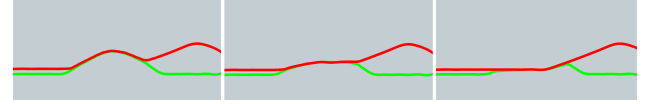


Figure 5: Le résultat de nos opérateurs sur les surfaces implicites de la figure 2 : la surface $\bar{f}_1 = 0$ en vert et la surface $\bar{f}_2 = 0$ en rouge. De gauche à droite, nous avons utilisé les paramètres de la figure 4. Notons que chaque surface possède une influence variable suivant le paramètre de rigidité relative.

des contraintes précédemment mentionnées comme illustrée en Figure 3.

Les résultats après application des opérateurs sont illustrés en Figure 5. Les surfaces implicites se retrouvent bien en contact dans la zone où elles étaient auparavant en intersection. En conjonction avec la figure 4, on a fait varier le paramètre de rigidité relative : la surface de contact est alors plus ou moins dépendante de l'état initial de l'une ou l'autre des deux surfaces.

6. Génération de plis intégrés au champ scalaire pour la correction de défauts d'isométrie

La déformation des surfaces implicite peut être associée à la compression locale des surfaces maillées trackant les 0-isovaleurs. Ces compressions de longueurs sont calculées, similairement à l'approche de [RPC*10], par un tenseur de déformation défini sur les triangles de la surface maillée déformée. Ces compressions sont ensuite corrigées par l'ajout de plis que l'on génère comme une perturbation locale du champ $\bar{f}_i$ en lui rajoutant un champ p .

Considérons le cas 1D de la mise en place d'une telle perturbation, illustrée en Figure 6.

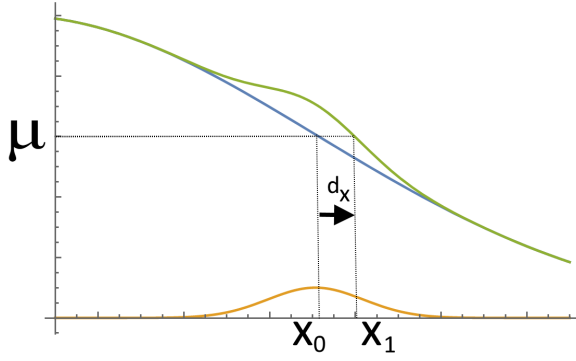


Figure 6: En bleu, une fonction f , en jaune une fonction p petite devant f , et en vert la somme des deux. La μ iso-valeur de f , x_0 , est translatée de dx sur la fonction verte. dx dépend de p et des variations de f en x_0 .



Figure 7: A gauche, deux cylindres jouent le rôle de deux couches de vêtements. La couche rouge est censé être sous la verte. Au milieu, après le skinning, les vêtements sont en intersection. A droite, les intersections sont corrigées.

Soit f et p deux fonctions suffisamment régulières telles que $\exists x_0, x_1, f(x_0) = 0$ et $g(x_1) = (f+p)(x_1) = 0$. x_0 est donc le 0-iso-niveau de f et x_1 le 0-iso-niveau de $g = f + p$. Par développement limité en x_0 , en posant $x_1 = x_0 + (x_1 - x_0)$, on trouve $x_1 = x_0 - \frac{g(x_0)}{f'(x_0) + g'(x_0)} = x_0 + dx$.

Ce raisonnement est poursuivi en 3d en annexe. On développera dans la partie "Implémentation" les fonctions utilisées pour nos plis.

7. Implémentation et Résultats

Nous présentons quelques résultats de cette approche dans le cas de vêtements déformés par skinning. Dans le cas présenté en Figure 7, deux couches de vêtements sont représentés au repos par des cylindres emboîtés modélisant par exemple de manière simplifiée un pull autour d'un bras. Lors du plis de ce bras par une approche de skinning classique, les deux couches de vêtements qui possèdent des poids de skinning indépendants entrent en collision (Figure 7-centre). Après correction par notre approche, la collision est transformée en surface de contact de manière robuste (Figure 7-droite).

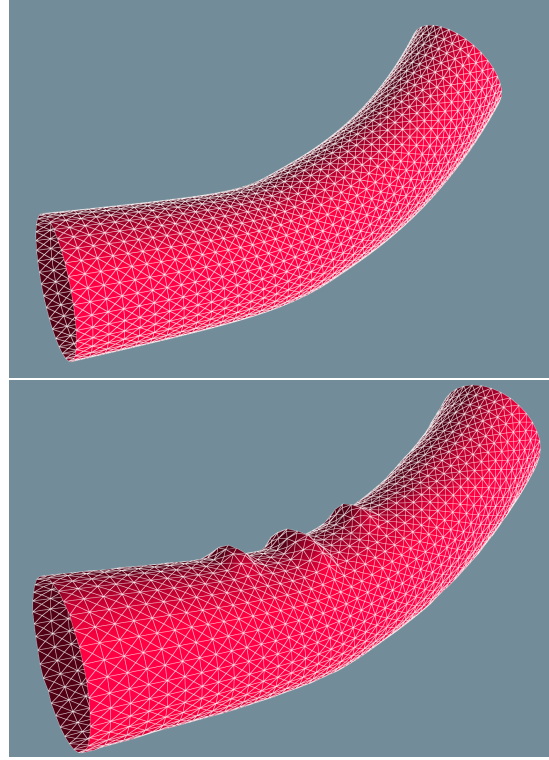


Figure 8: En haut, le skinning du cylindre entraînent nécessairement des compressions, notamment sur le dessus de celui-ci. En bas, le cylindre a été reprojété sur une surface implicite localement modifiée pour y ajouter des plis.

La figure 8 présente l'ajout de plis, permettant dans le cas présent de corriger la compression due à la déformation du skinning. Nous avons tout d'abord pré-définie des segments sur la surface appelée "squelette de plis" et correspond à l'origine du champ de perturbation. Des "sources de potentielles" p_j , à noyau gaussien : $p_j(X) = m_j \exp(-t(X - X_j)A_j(X - X_j))$ sont placés le long de ces squelettes. Notons que ces noyaux ne sont pas à supports compacts mais peuvent arbitrairement s'en approcher en les tronquant. Les positions de ces noyaux, les X_j , sont eux aussi skinnés et reprojétés de telle sorte que les plis restent collés aux vêtements.

Dans le cas présent, l'amplitude des plis est prédéfini, mais sera calculée automatiquement par rapport à la compression dans les futures versions de ce travail.

8. Conclusion et travaux Futurs

Nous avons présenté une approche implicite permettant de modifier l'animation de couches de vêtements. La conversion des surfaces maillées en surface implicite permet

une gestion simple des collisions à l'aide de nos opérateurs, et l'ajout des plis se fait en additionnant des champs scalaires aux champs des vêtements.

Actuellement, la méthode ne gère que 2 couches de vêtements. Une manière d'en gérer un nombre quelconque, ou d'ajouter la gestion du corps du personnage, serait d'itérer notre opérateurs sur chaque surface adjacente deux-à-deux. Une autre manière serait d'imaginer un opérateur n -aire qui permettrait l'interaction simultanée de toutes les couches.

9. Annexe : formule de plis en 3D

Soit $f : R^3 \rightarrow R$, et $p : R^3 \rightarrow R$ à support compact, et plaçons nous dans le cas particulier où le 0-isoniveau de f est plan : sans perte de généralité (à changement de repère près), considérons que $\{x, y, z \in R^3 / f(x, y, z) = 0\} = \{(x, y, 0) / x, y \in R\}$.

Soit $g = f + p$ et d_z tel que $g(x, y, d_z) = 0$.

Alors par développement limité en 0,

$$f(x, y, 0) + p(x, y, 0) = -d_z \left(\frac{\partial f}{\partial z}(x, y, 0) + \frac{\partial p}{\partial z}(x, y, 0) \right) \quad (1)$$

soit

$$d_z(x, y) = - \frac{f(x, y, 0) + p(x, y, 0)}{\frac{\partial f}{\partial z}(x, y, 0) + \frac{\partial p}{\partial z}(x, y, 0)} \quad (2)$$

$$d_z(x, y) = - \frac{p(x, y, 0)}{\frac{\partial f}{\partial z}(x, y, 0) + \frac{\partial p}{\partial z}(x, y, 0)} \quad (3)$$

On obtient ainsi, pour peu que les développements limités soient valables et donc que d_z soit d'amplitude faible devant les variations de f , une fonction représentant la forme du pli. L'hypothèse initiale, qui est que la 0-isosurface de f est un plan, est valable localement en approchant la surface implicite par son plan tangent. Il est donc en théorie possible, en choisissant bien p , de contrôler la forme du pli, et notamment sa surface pour essayer de corriger précisément les défauts d'isométrie du vêtement.

Références

- [ACOL00] ALEXA M., COHEN-OR D., LEVIN D. : As-rigid-as-possible shape interpolation. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, NY, USA, 2000), SIGGRAPH '00, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 157–164.
- [BFA02] BRIDSON R., FEDKIW R., ANDERSON J. : Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. *ACM Trans. Graph.* 21, 3 (July 2002), 594–603.
- [BGC01] BARTHE L., GAILDRAT V., CAUBET R. : Implicit extrusion fields : General concepts and some simple applications. In *Proceedings of the International Conference on Shape Modeling & Applications* (Washington, DC, USA, 2001), SMI '01, IEEE Computer Society, pp. 114–.
- [BHW94] BREEN D. E., HOUSE D. H., WOZNY M. J. : Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, NY, USA, 1994), SIGGRAPH '94, ACM, pp. 365–372.
- [BMF03] BRIDSON R., MARINO S., FEDKIW R. : Simulation of clothing with folds and wrinkles. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (Aire-la-Ville, Switzerland, 2003), SCA '03, Eurographics Association, pp. 28–36.
- [BW90] BLOOMENTHAL J., WYVILL B. : Interactive techniques for implicit modeling. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 24, 2 (Feb. 1990), 109–116.
- [BW98] BARAFF D., WITKIN A. : Large steps in cloth simulation. In *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, NY, USA, 1998), SIGGRAPH '98, ACM, pp. 43–54.
- [Can93] CANI M.-P. : An implicit formulation for precise contact modeling between flexible solids. In *20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93)* (Anaheim, United States, Aug. 1993), ACM, ACM SIGGRAPH, pp. 313–320. Published under the name Marie-Paule Gascuel.
- [CK05] CHOI K.-J., KO H.-S. : Research problems in clothing simulation. *Comput. Aided Des.* 37, 6 (May 2005), 585–592.
- [CMT05] CORDIER F., MAGNENAT-THALMANN N. : A data-driven approach for real-time clothes simulation†. *Computer Graphics Forum* 24, 2 (2005), 173–183.
- [CYTT92] CARIGNAN M., YANG Y., THALMANN N. M., THALMANN D. : Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. In *Proceedings*

- of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (New York, NY, USA, 1992), SIGGRAPH '92, ACM, pp. 99–104.
- [EDC96] EISCHEN J. W., DENG S., CLAPP T. G. : Finite-element modeling and control of flexible fabric parts. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 16, 5 (Sept. 1996), 71–80.
- [EWS96] EBERHARDT B., WEBER A., STRASSER W. : A fast, flexible, particle-system model for cloth draping. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 16, 5 (Sept. 1996), 52–59.
- [GBC*13] GOURMEL O., BARTHE L., CANI M.-P., WYVILL B., BERNHARDT A., PAULIN M., GRASBERGER H. : A gradient-based implicit blend. *ACM Trans. Graph.* 32, 2 (Apr. 2013), 12 :1–12 :12.
- [HEW17] HUBER M., EBERHARDT B., WEISKOPF D. : Cloth animation retrieval using a motion-shape signature. *IEEE Computer Graphics and Applications* 37, 6 (November 2017), 52–64.
- [IP96] INSTITUT X. P., PROVOT X. : Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In *In Graphics Interface* (1996), pp. 147–154.
- [KKN*13] KIM D., KOH W., NARAIN R., FATAHALIAN K., TREUILLE A., O'BRIEN J. F. : Near-exhaustive precomputation of secondary cloth effects. *ACM Trans. Graph.* 32, 4 (July 2013), 87 :1–87 :8.
- [LBOK13] LIU T., BARGTEIL A. W., O'BRIEN J. F., KAVAN L. : Fast simulation of mass-spring systems. *ACM Trans. Graph.* 32, 6 (Nov. 2013), 214 :1–214 :7.
- [MCKM15] MÜLLER M., CHENTANEZ N., KIM T.-Y., MACKLIN M. : Air meshes for robust collision handling. *ACM Trans. Graph.* 34, 4 (July 2015), 133 :1–133 :9.
- [MGV11] MACÊDO I., GOIS J. P., VELHO L. : Hermite radial basis functions implicits. *Computer Graphics Forum* 30, 1 (2011), 27–42.
- [MHHR07] MÜLLER M., HEIDELBERGER B., HENNIX M., RATCLIFF J. : Position based dynamics. *J. Vis. Commun. Image Represent.* 18, 2 (Apr. 2007), 109–118.
- [MMC16] MACKLIN M., MÜLLER M., CHENTANEZ N. : Xpbd : Position-based simulation of compliant constrained dynamics. In *Proceedings of the 9th International Conference on Motion in Games* (New York, NY, USA, 2016), MIG '16, ACM, pp. 49–54.
- [OTSG09] OTADUY M. A., TAMSTORF R., STEINEMANN D., GROSS M. : Implicit contact handling for deformable objects. *Computer Graphics Forum* 28, 2 (2009), 559–568.
- [RPC*10] ROHMER D., POPA T., CANI M.-P., HAHMANN S., ALLA S. : Animation Wrinkling : Augmenting Coarse Cloth Simulations with Realistic-Looking Wrinkles. *ACM Transactions on Graphics* 29, 5 (Dec. 2010), 157. Special Issue : SIGGRAPH Asia 2010.
- [SSIF09] SELLE A., SU J., IRVING G., FEDKIW R. : Robust high-resolution cloth using parallelism, history-based collisions, and accurate friction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15, 2 (Mar. 2009), 339–350.
- [TKH*05] TESCHNER M., KIMMERLE S., HEIDELBERGER B., ZACHMANN G., RAGHUPATHI L., FUHRMAN A., CANI M.-P., FAURE F., MAGNENAT-THALMANN N., STRASSER W., VOLINO P. : Collision Detection for Deformable Objects. *Computer Graphics Forum* (2005).
- [TPBF87] TERZOPOULOS D., PLATT J. C., BARR A. H., FLEISCHER K. W. : Elastically deformable models. In *SIGGRAPH* (1987).
- [TTN*13] TANG M., TONG R., NARAIN R., MENG C., MANOCHA D. : A gpu-based streaming algorithm for high-resolution cloth simulation. *Computer Graphics Forum* 32, 7 (2013), 21–30.
- [TWT*16] TANG M., WANG H., TANG L., TONG R., MANOCHA D. : CAMA : Contact-aware matrix assembly with unified collision handling for GPU-based cloth simulation. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2016)* 35, 2 (2016), 511–521.
- [VCMT95] VOLINO P., COURCHESNE M., MAGNENAT-THALMANN N. : Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, NY, USA, 1995), SIGGRAPH '95, ACM, pp. 137–144.
- [VGB*14] VAILLANT R., GUENNEBAUD G., BARTHE L., WYVILL B., CANI M.-P. : Robust iso-surface tracking for interactive character skinning. *ACM Trans. Graph.* 33, 6 (Nov. 2014), 189 :1–189 :11.
- [VMT06] VOLINO P., MAGNENAT-THALMANN N. : Resolving surface collisions through intersection contour minimization. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers* (New York, NY, USA, 2006), SIGGRAPH '06, ACM, pp. 1154–1159.
- [Wen04] WENDLAND H. : *Preface*. Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics. Cambridge University Press, 2004, pp. ix–x.
- [WHRO10] WANG H., HECHT F., RAMAMOORTHY R., O'BRIEN J. F. : Example-based wrinkle synthesis for clothing animation. In *ACM SIGGRAPH 2010 Papers* (New York, NY, USA, 2010), SIGGRAPH '10, ACM, pp. 107 :1–107 :8.
- [YKH*10] YOON S.-E., KIM Y. J., HARADA T., KIM Y. J., YOON S.-E. : Recent advances in real-time collision and proximity computations for games and simulations. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2010 Courses* (New York, NY, USA, 2010), SA '10, ACM, pp. 22 :1–22 :110.