

Simulation du drapé des tissus par maillages adaptatifs

Julien Villard ^a, Houman Borouchaki ^a, Dominique Chapelle ^b

^a Université de technologie de Troyes, GSM-LASMIS, BP 2060, 10010 Troyes cedex, France

^b INRIA – Rocquencourt, BP 105, 78153 Le Chesnay cedex, France

Reçu le 30 avril 2002 ; accepté le 23 juillet 2002

Note présentée par Olivier Pironneau.

Résumé

La plupart des méthodes de simulation numérique du tombé de tissus sont basées sur un modèle mécanique s'appuyant, en général, sur un maillage surfacique uniforme. Le tissu étant un matériau très souple, de nombreux plis peuvent se former sur sa surface lorsque celui-ci est en mouvement libre ou contraint (collisions, points d'arrimage, etc.). Le problème de la simulation est de faire évoluer le système mécanique tout en ayant une représentation géométrique réaliste de la surface. Il se pose alors un problème de discrétisation adéquate de la surface. Pour remédier, à ce problème, nous proposons une méthode basée sur un maillage adaptatif permettant au modèle mécanique d'évoluer sans la contrainte d'un maillage uniforme. Nous décrivons aussi un nouveau modèle mécanique adapté ainsi que notre méthode de raffinement local du maillage. Un exemple numérique vient illustrer l'intérêt de notre méthode. *Pour citer cet article : J. Villard et al., C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I 335 (2002) 561–566.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Adaptive meshing for cloth draping

Abstract

Numerical simulation methods regarding fabric and cloth draping are generally based on mechanical models. These models are usually applied to uniform grids representing the true geometry of the fabric. Fabrics being a very flexible material, wrinkles appear on its surface when submitted to free or constrained motion. The main problem of the simulation is to represent realistically cloth surface motion. This is strongly dependent on the surface discretization. We present a new cloth animation scheme based on adaptive surface discretization. It can be seen as a multi-grid method which allows us to obtain realistic simulations. We propose also a new mechanical model well suited to our adaptive meshing strategy. A numerical example is given to show the efficiency of the method. *To cite this article: J. Villard et al., C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I 335 (2002) 561–566.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Adresses e-mail : Julien.Villard@utt.fr (J. Villard); Houman.Borouchaki@utt.fr (H. Borouchaki); Dominique.Chapelle@inria.fr (D. Chapelle).

Abridged English version

Cloth simulation methods are based, in general, on mechanical models. The cloth is geometrically defined by a uniform grid. Fabrics being a very flexible material, wrinkles appear on its surface when submitted to free or constrained motion. The main problem of the simulation is to represent realistically cloth surface motion. This is strongly dependent on the surface discretization. We present a new cloth animation scheme based on adaptive surface discretization. It can be seen as a multi-grid method which allows us to obtain realistic simulations. Our mechanical model is inspired by the Provot model, a particle network linked together by springs. The mechanical properties of cloth: stretching, shearing and bending are modeled using springs. Stretching and shearing forces are computed using a modified Hook's law taking into account multi-grid mesh. A new computation of the bending forces, based on beams mechanical behaviour, is introduced. This model is well adapted to a multi-grid particles system. External forces are also applied to the system: gravity, air viscosity and so on. The mass of each particle is proportional to the area occupied by the associated node in the mesh. Euler's method is used to solve the ODE problem. The cloth surface is initially discretized with uniform quad elements oriented along the warp and weft directions. The adaptive method consists in subdividing the four quads sharing a node if the surface is wrinkled in the neighbourhood of the node. Virtual nodes are then added, to ensure the conformity of the mesh with respect to the mechanical model (which take into account all the mesh nodes). The proposed scheme is stable with respect to the mesh element size and it preserves moments. A numerical example using adaptive meshing is given to show the efficiency of the method. The result is quite similar to that obtained using a fine uniform mesh.

1. Introduction

L'animation de tissus et de vêtements virtuels fait l'objet de nombreuses recherches en informatique graphique et en mécanique. L'étude du tombé de tissus (ou du drapé) consiste à simuler numériquement le comportement d'une étoffe lâchée au dessus d'une scène, ou d'un objet (table, boule). Le problème de la simulation du comportement de ce matériau vient du fait qu'il est extrêmement mince et très souple, sans pour autant être élastique. Toute la difficulté de la simulation du tombé de tissus vient de la représentation correcte des plis sur le tissu lorsqu'il est en mouvement (chute, vent, etc).

Il existe plusieurs méthodes pour simuler le tombé ou le drapé de tissus (voir [2] pour un état de l'art). Parmi ces méthodes, celles basées sur le comportement mécanique du tissu donnent un résultat proche de la réalité physique. Dans ce cadre, Provot [3] a proposé un modèle à particules, un système masses-ressorts qui a l'avantage d'être simple et rapide. D'autres modèles plus sophistiqués ont été proposés par Terzopoulos et al. [4] et Volino et al. [5] donnant un résultat similaire à celui de Provot. Toutes ces méthodes utilisent des maillages uniformes de tissus. Hutchinson et al. [1] ont proposé une méthode multi-échelles qui ne semble pas bien fonctionner quand le tissu subit d'importantes flexions.

Nous avons focalisé notre attention sur deux points importants de ce type de simulation. Le premier point est le support de ce modèle, c'est-à-dire le maillage représentant la surface du tissu. Pour être plus réaliste et pour réduire les coûts de calculs, nous proposons une méthode d'adaptation de maillage appliquée à un quadrillage initial grossier du tissu, orienté suivant la chaîne et la trame. Le deuxième point est le modèle mécanique. Nous avons repris et adapté le modèle de Provot aux maillages évolutifs du tissu. Un exemple de simulation est donné pour illustrer la méthode.

2. Maillage adaptatif du tissu

La surface du tissu est modélisée, dans un premier temps, par un maillage quadrangulaire uniforme grossier. Ce maillage est constitué d'un ensemble de nœuds et d'arêtes alignées suivant les chaînes et les trames du tissu. Lorsque le tissu est en mouvement, le maillage correspondant doit être adapté à sa forme géométrique, permettant ainsi d'avoir une représentation précise de la surface du tissu. L'adaptation consiste alors à raffiner localement le maillage dans les zones où la surface présente de fortes courbures. Il se pose alors les deux problèmes suivants :

- comment raffiner localement le maillage tout en préservant la topologie des chaînes et des trames,
- quel est le modèle mécanique qui supporte le raffinement considéré.

Pour conserver la topologie des chaînes et des trames, deux types de raffinements sont possibles suivant l'analyse de la courbure surfacique. Le premier consiste à subdiviser les éléments quadrangulaires « courbés » en quatre éléments quadrangulaires de taille deux fois plus petite. Ainsi, dans ce cas, pour chaque élément subdivisé, cinq nouveaux nœuds sont créés (un au barycentre de l'élément et quatre au milieu de ses arêtes) si les éléments adjacents n'ont pas été subdivisés. Le deuxième type de raffinement consiste à subdiviser de la même manière les plus grands éléments partageant les nœuds présentant une courbure. De même pour chaque élément subdivisé, cinq nœuds sont éventuellement créés. Ces deux types de raffinement génèrent des maillages non conformes (un nœud peut être créé sur une arête d'un élément sans que l'élément soit subdivisé). Pour assurer la cohérence du maillage vis-à-vis du modèle mécanique utilisé, deux types de nœuds sont considérés : actif et virtuel. Les nœuds actifs sont ceux pour lesquels la connexité du maillage est conforme. Ils partagent quatre éléments et contribuent à la simulation mécanique du tissu en mouvement. Les nœuds virtuels représentent tous les autres nœuds. Ils sont créés afin d'assurer la topologie des chaînes et des trames du tissu. Ils partagent trois éléments et leur contribution mécanique est transmise aux nœuds actifs directement voisins.

Bien que plus complexe, nous avons retenu le deuxième type de raffinement comme la courbure surfacique en un nœud est mieux définie que celle en un élément du maillage. A titre d'illustration, la Fig. 1 montre trois applications successives de ce procédé de raffinement, la configuration initiale étant quatre éléments partageant un nœud P . Un premier raffinement en P consiste à subdiviser les quatre éléments partageant P en seize éléments, huit nœuds actifs (en gris sur la figure) et huit nœuds virtuels (en blanc sur la figure) sont créés. Puis un deuxième raffinement en un nouveau nœud Q créé à l'étape précédente subdivise, de même, quatre éléments en seize et seize nouveaux nœuds sont créés. Un troisième raffinement à nouveau en P consiste dans ce cas à subdiviser uniquement les trois plus grands éléments partageant P . Dans ce cas, deux anciens nœuds virtuels deviennent actifs, cinq autres nouveaux nœuds actifs ainsi que six nouveaux nœuds virtuels sont créés.

Le critère de raffinement (en un nœud) est uniquement basé sur des considérations géométriques sous-jacentes au maillage actuel du tissu. Le raffinement est appliqué en un nœud actif si la courbure locale de la surface, en ce nœud, dépasse un seuil donné. Pour simplifier, au lieu de la courbure locale on considère la déviation de la surface par rapport au plan tangent. Cette déviation est calculée à partir d'une estimation de la normale à la surface au nœud considéré. la normale en un nœud actif P peut être approchée par la moyenne des normales aux huit triangles s'appuyant sur P , en considérant les quatre nœuds directement adjacents à P ainsi que les barycentres des éléments partageant P . La déviation de la surface en P représente alors le plus grand angle entre la normale en P et les normales aux huit triangles associés s'appuyant sur P .

Chaque nœud du maillage, étant une particule d'un système mécanique, possède une masse. A l'étape initiale (avant le raffinement), la masse du tissu peut être équirépartie aux nœuds du maillage (comme celui-

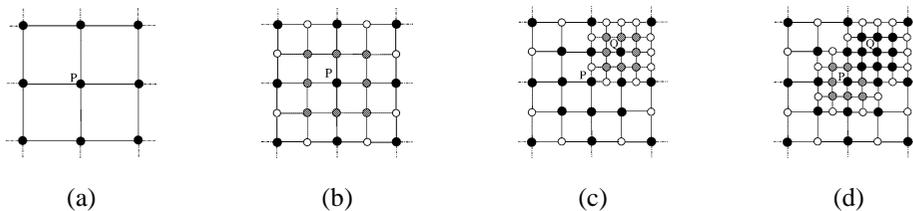


Figure 1. – Raffinement autour des nœuds P , puis Q et à nouveau P .

Figure 1. – Mesh refinement at node P , then Q , and again at P .

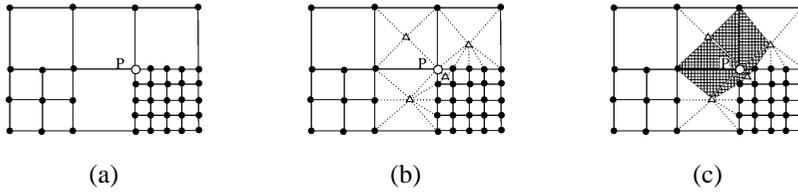


Figure 2. – Calcul de la masse d'un nœud.

Figure 2. – Mass computation of a node.

ci est uniforme). Lors du raffinement du maillage, à chaque nouveau nœud doit être associée une masse et les masses des anciens nœuds peuvent éventuellement être modifiées. Le maillage lors de l'adaptation n'étant plus uniforme, la masse du tissu ne peut être répartie uniformément aux nœuds. Comme la masse surfacique totale du tissu doit être la même avant et après le raffinement du maillage, on peut considérer que la masse d'un nœud est proportionnelle à l'aire occupée par ce nœud. L'aire occupée par un nœud peut être calculée de la même manière que pour la normale à la surface en ce nœud. Dans le cas d'un nœud actif, on considère ainsi que sa masse est égale à la moitié des aires des huit triangles associés s'appuyant sur ce nœud à partir des quatre nœuds directement adjacents et des barycentres des éléments partageant ce nœud, La Fig. 2 montre l'aire occupée par le nœud P .

Le critère de raffinement du maillage est purement géométrique. En effet, dès que la déviation angulaire par rapport au plan tangent en un nœud dépasse un seuil fixé, le maillage est raffiné autour de ce nœud. Ainsi, il est tout à fait possible d'avoir des éléments adjacents de taille différente, comme c'est le cas par exemple sur le schéma 2. Ceci peut créer des nœuds virtuels directement adjacents et ainsi alourdir la transmission des efforts mécaniques de ces nœuds aux nœuds actifs adjacents. Pour éviter la création de nœuds virtuels directement adjacents, on peut équilibrer le maillage, c'est-à-dire que deux éléments adjacents auront un rapport de taille d'au plus égal à deux. Le procédé d'équilibrage est un procédé classique d'équilibrage d'arbre quaternaire.

3. Modèle mécanique adapté

On considère un modèle classique basé sur un réseau de particules reliées entre-elles par des ressorts sans masse correspondant à trois propriétés mécaniques des tissus (la traction, le cisaillement et la flexion) et on propose une amélioration pour le calcul des forces de flexion. La traction est l'élongation du tissu dans le sens horizontal et vertical, alors que le cisaillement représente l'étirement du tissu dans le sens diagonal. Enfin, la flexion correspond à la courbure géométrique que prend le tissu. Ces trois phénomènes sont très différents et n'interviennent pas de la même façon. En particulier, un tissu est peu déformable en traction, par contre il est très déformable en flexion. A ces trois forces internes (traction, cisaillement, flexion), s'ajoutent des forces externes : gravité, résistance de l'air, vent, etc.

Chaque particule du système mécanique correspond à un nœud du maillage et les ressorts de traction sont matérialisés par les arêtes du maillage. Le calcul des forces de traction entre un nœud A et l'un de ses voisins B est calculé grâce à la formule de Hooke donnée par :

$$F_{\text{tra}}(A, B) = K_{\text{tra}}(\ell_{AB} - \ell_{AB}^0), \tag{1}$$

où K_{tra} est le coefficient de raideur des ressorts, ℓ_{AB}^0 est la distance $|AB|$ à t_0 et ℓ_{AB} est la distance $|AB|$ à l'instant t . Il s'agit d'une formule générale qui s'applique en chaque nœud du système pour des ressorts de même dimension. Comme notre système est « multi-échelles », nous devons adapter cette formule pour prendre en compte la variation de raideurs. Ajouter un nouveau nœud sur une arête revient à remplacer un ressort de longueur ℓ par deux ressorts en série de longueur $\ell/2$. Par conséquent, la raideur de ces deux petits ressorts doit être modifiée pour que les forces en jeu soient les mêmes. Le calcul des forces de traction entre deux nœuds voisins du maillage devient donc :

$$F_{\text{tra}}(A, B) = K_{\text{tra}} \cdot 2^{\varphi(AB)} \cdot (\ell_{AB} - \ell_{AB}^0). \tag{2}$$

La fonction $\varphi(AB)$ indique à quel niveau se situe le ressort AB dans notre modèle multi-échelle, tout en sachant que le niveau initial est le niveau 0. Le calcul des forces de cisaillement est formulé de la même manière que les forces de traction, seul le coefficient de raideur des ressorts diffère. Les ressorts de cisaillement lient chaque nœud à ses quatre nœuds voisins diagonaux.

Dans l'approche classique, la flexion est modélisée en chaque nœud, suivant les directions de chaîne et de trame, soit par des ressorts angulaires entre les deux voisins directs, soit par des ressorts liant le nœud aux deuxièmes voisins directs. Dans la première approche, il semble difficile de bien définir les forces de réaction. Dans la seconde, les voisins d'ordre deux sont pris en compte, ce qui est incompatible avec notre modèle de raffinement. Nous proposons une nouvelle approche pour le calcul des forces de flexion, basée sur la mécanique des poutres. Sur la Fig. 3(a), le module de la force \vec{F} appliquée en bout de poutre est homogène à $(EI \cdot \alpha)/\ell^2$. En considérant que EI est assimilable à un coefficient de raideur et que α/ℓ^2 équivaut à un allongement, cela revient à la formule générale (1). Dans notre cas, si l'on considère le nœud P et ses deux voisins directs A et B intervenant dans la flexion, on peut dire que les arêtes PA et PB sont deux barres rigides s'articulant autour du nœud P (Fig. 3(b)). Lorsqu'elles ne sont soumises à aucune force, ces deux barres sont colinéaires et forment un angle \widehat{APB} de π radians. Pour calculer la force appliquée en P , on calcule d'abord les deux forces de réactions \vec{R}_A et \vec{R}_B appliquées respectivement en A et en B . Ensuite de ces deux forces, on en déduit $\vec{F} = -(\vec{R}_A + \vec{R}_B)$ (Fig. 3(b)). Les forces \vec{R}_A et \vec{R}_B sont calculées de la même manière. Soient $\vec{u}_A = \vec{PA}/\|\vec{PA}\|$, $\vec{u}_B = \vec{PB}/\|\vec{PB}\|$ et $\vec{n} = \vec{u}_A \wedge \vec{u}_B$, alors on a :

$$\vec{R}_A = K_{\text{fle}} \frac{\alpha_A + \alpha_B}{\ell_{AP} \cdot (\ell_{AP} + \ell_{BP})} (\vec{u}_A \wedge \vec{n}). \quad (3)$$

L'intérêt de ce mode de calcul est que les forces de réaction dépendent de la longueur des arêtes AP et BP et que le système de forces est de torseur nul. C'est un avantage certain puisque notre modèle est multi-échelles. De plus, ce nouveau modèle mécanique n'est pas sensible aux changements d'échelles.

Concernant l'intégration, nous avons opté pour la méthode d'Euler explicite. Les nouvelles positions des particules sont donc calculées en trois étapes successives :

$$\begin{cases} \vec{\gamma}_A(t + \delta t) = \frac{1}{m_A} \sum \vec{F}_A(t), \\ \vec{v}_A(t + \delta t) = \vec{v}_A(t) + \delta t \cdot \vec{\gamma}_A(t + \delta t), \\ P_A(t + \delta t) = P_A(t) + \delta t \cdot \vec{v}_A(t + \delta t), \end{cases} \quad (4)$$

où δt est le pas de temps d'intégration adapté (dépendant en partie de la plus petite taille du maillage). Pour obtenir un système stable, nous devons limiter et diminuer d'un certain facteur les vitesses au cours des itérations.

4. Application numérique

L'exemple que nous considérons Fig. 4 est le drapé d'une étoffe carrée sur une boule. Dans un premier temps, nous avons comparé deux simulations différentes où seul un paramètre différait : le pas

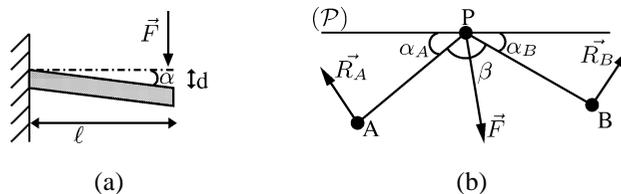


Figure 3. – (a) Poutre en flexion et (b) notre mode de calcul pour la flexion.

Figure 3. – (a) Bent beam, and (b) our bending computation mode.

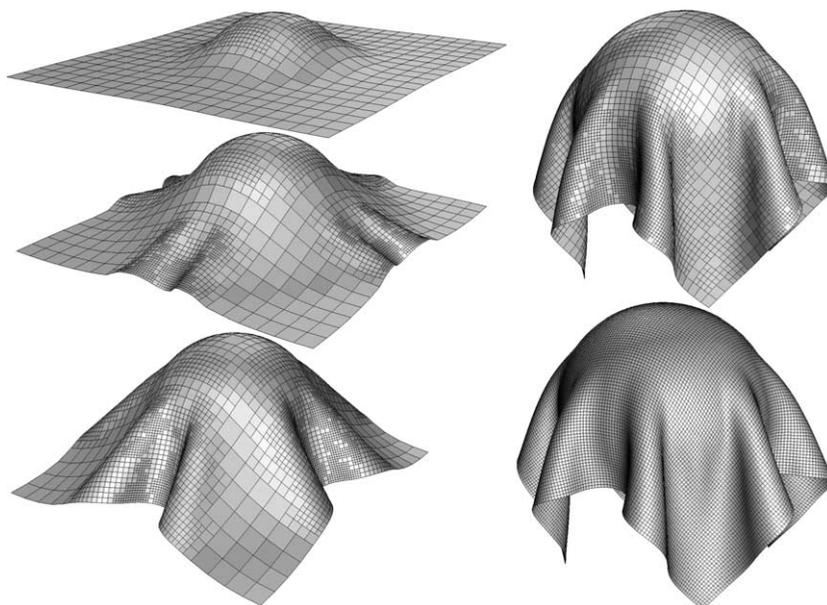


Figure 4. – Drapé d'une étoffe carrée sur une boule.

Figure 4. – A square piece of cloth draped over a sphere.

de discrétisation de la surface drapée. La première a été réalisée avec un pas h et la seconde avec un pas de $h/2$. Ces deux simulations ont donné deux drapés quasiment identiques. Puis, nous avons appliqué notre méthode d'adaptation qui a nécessité 11000 itérations pour un critère de raffinement fixé à une déviation de 12° du plan tangent. Le maillage de départ est un maillage carré 20×20 représentant une étoffe mesurant 40 cm de côté. L'objet sur lequel est posé cette pièce de tissu est une boule de diamètre 12 cm. Le résultat final est composé de 11500 nœuds et a nécessité 4 min 15 s de calculs sur une station HP 9000/785 cadencée à 552 MHz. Ce résultat est comparé avec le drapé obtenu avec un maillage uniforme contenant plus de 22000 nœuds et ayant nécessité plus de 30 m de calcul. Ces deux maillages sont pratiquement confondus lorsqu'on les superpose.

5. Conclusion et perspectives

La méthode proposée semble donner de résultats stables reflétant bien la réalité physique du tissu. Cependant plusieurs améliorations peuvent être apportées. En particulier, en plus du raffinement, le déraffinement au cours des itérations peut nettement accélérer la convergence du calcul. Par ailleurs les problèmes de collisions n'ont pas été traités (pour l'exemple proposé, ce problème est résolu d'une manière analytique).

Références bibliographiques

- [1] D. Hutchinson, M. Preston, T. Hewitt, Adaptive refinement for mass/spring simulations, in: 7th Workshop on Animation and Simulation, Poitiers, France, 1996.
- [2] N.Ng. Hing, L.R. Grimsdale, Computer graphics techniques for modeling cloth, IEEE Comput. Graphics Appl. 16 (5) (1996) 28–41.
- [3] X. Provot, Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour, in: Computer Interface Proceedings, Quebec City, Canada, 1995, pp. 147–154.
- [4] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, K. Fleischer, Elastically deformable models, Comput. Graphics 21 (4) (1987) 205–214.
- [5] P. Volino, N.M. Thalmann, S. Jianhua, D. Thalmann, An evolving system for simulating clothes on virtual actors, IEEE Comput. Graphics Appl. 16 (5) (1996) 42–51.