

**MÉTODO IMPLEMENTADO POR ORDENADOR, SISTEMA Y PRODUCTO DE
PROGRAMA DE ORDENADOR PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE UN TEJIDO
ENTRETEJIDO A NIVEL DE HILO**

DESCRIPCIÓN

5 Campo de la Invención

La presente invención está comprendida dentro del campo de las simulaciones del comportamiento de la tela entretejida a un nivel de hilo.

Estado de la invención

10 La tela entretejida está formada por hilos entrelazados, normalmente dos conjuntos de hilos ortogonales llamados urdimbre y trama. Los hilos entrelazados están sometidos a fuerzas de fricción en los contactos hilo a hilo, y esta fricción mantiene unido el tejido entretejido, en contraste con los tejidos de punto, que se mantienen unidos por los hilos de costura. El tejido entretejido es ubicuo, y exhibe diversos patrones de entretejidos y materiales de hilos, tanto rígidos como elásticos. Los tejidos entretejidos comunes incluyen gasa, pana, dril de
15 algodón, franela, gabardina, bramante, o terciopelo.

La mecánica a gran escala de la tela entretejida se dicta por el comportamiento a escala fina de los hilos, sus propiedades mecánicas, la distribución, y las interacciones de contacto. Sin embargo, los modelos de tela populares, con la notable excepción del trabajo de Kaldor et al. [2008; 2010], no modela las mecánicas a nivel de hilo. Usan elementos específicos, como
20 en el caso de los sistemas de masa-resorte [Breen et al. 1994; Provot 1995], o especificaciones de formulaciones continuas, como en el caso de los modelos de elementos finitos [Eitzmuss et al. 2003].

Tales modelos especificados son a menudo suficientes para capturar el comportamiento relevante de la tela entretejida, en particular, drapeado bajo fuerzas moderadas. Pero los
25 modelos a nivel de hilo presentan interesantes posibilidades para la animación por ordenador. Efectos visuales interesantes, tales como el desgarrar detallado, los enganches, o los extremos de los hilos sueltos requieren modelar hilos individuales. Por otra parte, los modelos basados en hilos pueden constituir la piedra angular para desarrollar soluciones precisas para una simulación de tela a gran escala, poniendo al descubierto las
30 interacciones no lineales y complejas medidas en los tejidos reales [Wang et al. 2011; Miguel et al. 2012; Miguel et al. 2013].

El coste computacional ha sido el desafío clave para hacer frente a la simulación de tela a nivel de hilo. La captura de la mecánica de los hilos individuales requiere el uso de modelos de varilla [Pai 2002; Spillmann y Teschner 2009; Bergou et al. 2008; Casati y Bertails-Descoubes 2013], y los patrones de entretejido que producen un número de contactos que es cuadrático en el número de hilos. Incluso el modelado de tejidos de baja densidad de hilo conduce pronto a una explosión en el número de grados de libertad (DoF) y contactos, y los tejidos comunes pueden contener del orden de 100 hilos/pulgada.

La mayoría de los modelos de simulación de tela en gráficos de ordenador consideran la tela como una cáscara delgada y formulan un modelo de deformación elástica para capturar su mecánica [Terzopoulos et al. 1987]. A continuación, el modelado de la tela se enfrenta al reto de definir las energías y las especificaciones de deformación que son robustas y coincidentes numéricamente al comportamiento de la tela real. Algunos hitos clave en el modelo de tela en gráficos de ordenador incluyen: los modelos masa-resorte que se aproximan al comportamiento de los tejidos entretejidos reales [Breen et al. 1994], la incorporación del esfuerzo limitante al modelo de inextensibilidad [Provot 1995], el manejo eficiente de las auto-colisiones [Volino et al. 1995], la definición de las energías de deformación de las restricciones con la integración del tiempo eficiente [Baraff y Witkin 1998], los modelos robustos para manejar el pandeo [Choi y Ko 2002], los modelos de flexión consistentes [Bridson et al. 2003; Grinspun et al. 2003], la inextensibilidad eficiente [Goldenthal et al. 2007] y el remallado dinámico eficiente [Narain et al. 2012].

Los últimos trabajos en la animación por ordenador han pretendido también que coincidan con el comportamiento no lineal en una tela real. Trabajos relevantes incluyen el diseño de modelos paramétricos no lineales [Volino et al. 2009], la estimación de los coeficientes del material a partir de los ejemplos de fuerza y deformación [Wang et al. 2011; Miguel et al. 2012] y el diseño de los modelos de fricción interna para capturar la histéresis de la tela [Miguel et al. 2013].

En contraste con los modelos de cáscara fina populares, Kaldor et al. [2008] modela la dinámica de la tela de punto a nivel de hilo, lo que les permite predecir el comportamiento a gran escala de todas las prendas a partir de las mecánicas de hilo fundamentales. Capturan la mecánica de los hilos individuales usando un modelo de varilla inextensible, y un contacto de hilo a hilo con una combinación de fuerzas de penalización rígidas y la fricción de velocidad-filtro. Más tarde, en [2010], extendieron su trabajo para acelerar el manejo de contactos hilo a hilo, usando linealizaciones giradas locales de las fuerzas de penalización. Sin embargo, la presente invención propone una solución más eficiente para el caso de la

tela entretejida que evita por completo el manejo del contacto hilo a hilo en los cruces de hilos. Metaaphanon et al. [2009] propuso un modelo a nivel de hilo para una tela entretejida. Modelan la interacción de hilo a hilo estableciendo restricciones entre los puntos extremos de urdimbre y los resortes de trama. Además, diseñan una transición automática a partir de un modelo de masa-resorte hasta el modelo a nivel de hilo.

Los modelos a nivel de hilo se han estudiado a fondo en el campo de la investigación textil. Los modelos analíticos en base a hilos [Hearle et al. 1969] se han usado para predecir el comportamiento de las mecánicas del tejido bajo modos específicos de deformación, por lo general, en base a modelos de hilos geométricos. Estos modelos analíticos, tales como los hilos transversales circulares paramétricos de Peirce [Peirce 1937] o los entramados de pasador unido mucho más simples de Kawabata [Kawabata et al. 1973], los hilos de modelo en los puntos de cruce que adoptan el contacto persistente y que representan la separación de rizado. Sin embargo, como para la mayoría de los modelos analíticos, estos enfoques se limitan a los casos específicos para los que se han diseñado, y desarrollan un marco analítico para los casos de carga generales que serían extremadamente complejos [King et al. 2005], permitiendo solo prendas enteras.

Surgieron los modelos continuos en base a la mesoestructura para simular muestras de tejido más grandes [Boisse et al. 1997; Parsons et al. 2010]. Estos modelos aproximan el tejido entretejido como un continuo, en el que cada punto de material representa una sección de los hilos. A continuación, se simula cada sección usando una unidad de celda analítica muy simplificada que emplea, por ejemplo, el modelo de entramado de pasador unido de Kawabata.

Otra familia de modelos intenta simular el tejido completo a nivel de hilo usando especificaciones de elementos finitos de hilos volumétricos, representando todas las interacciones de hilo [Ng et al. 1998; Page y Wang 2000; Duan et al. 2006]. Sin embargo, los elevados requerimientos computacionales hacen que sean intratables para grandes muestras de forma moderada. Se ha logrado una mayor eficiencia computacional sustituyendo los hilos volumétricos complejos por elementos más simples, tales como plegadores, entramados y membranas [Reese 2003; McGlockton et al. 2003]. Otro enfoque interesante es recurrir a mecánicas a nivel de hilo costosas solo cuando sea necesario, usando modelos multiescala que emparejan descripciones continuas y a nivel de hilo [Nadler et al. 2006].

En cierto modo, las técnicas híbridas se basan en enfoques continuos en base a la

- mesoestructura, pero usando un modelo específico para celdas unitarias. Estas celdas permiten un cumplimiento axial y pueden aumentarse con la flexión y los resortes de cruce para simular una deformación de sección transversal y un tundido en los puntos de cruce [King et al. 2005; Xia y Nadler 2011]. Se logra una interferencia de tundido introduciendo
- 5 elementos de entramado normales en los hilos para simular las fuerzas de contacto entre los hilos [King et al. 2005]. Sin embargo, ya que los hilos están colgados juntos en los puntos de cruce, estos enfoques de celdas unitarias evitan el deslizamiento del hilo. Parsons y colaboradores [2013] abordan el deslizamiento del hilo introduciendo un campo de velocidad de deslizamiento en el nivel continuo, con las fuerzas calculadas a nivel meso usando la
- 10 celda unitaria. Las fuerzas de fricción de deslizamiento son proporcionales a las fuerzas normales en los puntos de cruce. Sin embargo, estos enfoques no suelen simular cada hilo en el tejido, evitando de esta manera los efectos de hilos simples interesantes tales como los enganches, los bordes deshilachados, las fracturas de hilos y las retiradas de hilos. Además, los modelos a nivel de hilo normales en la investigación textil adoptan un contacto
- 15 persistente entre los hilos entretejidos, pero no resuelven las posiciones de hilo bajo los movimientos de prendas libres, solo experimentos controlados. Por el contrario, el enfoque de la presente invención permite simular cada hilo en el tejido como una varilla, al tiempo que se reducen enormemente las costosas interacciones de contacto haciendo el contacto persistente e introduciendo unos grados de libertad deslizantes adicionales.
- 20 Un aspecto esencial de la simulación a nivel de hilo es la elección del modelo de varilla para capturar las mecánicas de los hilos individuales. Pai [2002] desarrolló un algoritmo eficiente para simular las varillas modeladas siguiendo la teoría de Cosserat. Spillmann y Teschner [2007] han mejorado los modelos de Cosserat para manejar el contacto de manera eficiente, y más tarde en [2009] los ampliaron para manejar las estructuras ramificadas y de bucle.
- 25 Bergou et al. [2008] presentó un enfoque para una simulación de varilla que desacopla la dinámica de la línea central a partir de una solución cuasi estática de torsión en base al transporte paralelo. Casati y Bertais-Descoubes [2013] han evolucionado recientemente los modelos en base a la clotoide para resolver de manera eficiente las dinámicas de las varillas abundantes y lisas con muy pocos puntos de control.
- 30 Como se ha descrito anteriormente, el principal reto en la tela de modelado a nivel de hilo es el manejo de contacto eficiente entre los hilos. Sueda et al. [2011] presenta un modelo adecuado para simular varillas altamente restringidas de manera eficiente. La percepción clave de su modelo es describir la cinemática de las varillas restringidas usando un conjunto óptimo de coordenadas generalizadas, formadas por las así llamadas coordenadas de

Lagrange que capturan el movimiento absoluto, y por las así llamadas coordenadas de Eulerian que capturan el deslizamiento en colectores de restricción. Este enfoque se ajusta para representar hilos restringidos en telas entretejidas, de manera que se ha diseñado actualmente una especificación para un caso no manejado por Sueda et al., que consta de dos varillas en contacto deslizante.

Referencias

BARAFF, D., AND WITKIN, A. 1998. Large steps in cloth simulation. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 98, 4354.

BELL, N., AND GARLAND, M., 2012. Cusp: Generic parallel algorithms for sparse matrix and graph computations. Versión 0.3.0.

BERGOU, M., WARDETZKY, M., ROBINSON, S., AUDOLY, B., AND GRINSUN, E. 2008. Discrete elastic rods. ACM Trans. Graph. 27, 3, 63:163:12.

BERTHOUSOZ, F., GARG, A., KAUFMAN, D. M., GRINSUN, E., AND AGRAWALA, M. 2013. Parsing sewing patterns into 3D garments. ACM Trans. Graph. 32, 4, 85:1–85:12.

BOISSE, P., BORR, M., BUET, K., AND CHEROUAT, A. 1997. Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behaviour. Composites Part B: Engineering 28, 4, 453–464.

BREEN, D. E., HOUSE, D. H., AND WOZNY, M. J. 1994. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 94, 365–372.

BRIDSON, R., MARINO, S., AND FEDKIW, R. 2003. Simulation of clothing with folds and wrinkles. In Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation 2003, 2836.

CASATI, R., AND BERTAILS-DESCOUBES, F. 2013. Super space clothoids. ACM Trans. Graph. 32, 4, 48. CHEN, Y., LIN, S., ZHONG, H., XU, Y.-Q., GUO, B., AND SHUM, H.-Y. 2003. Realistic rendering and animation of knitwear. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 9, 1 (Jan.), 43–55.

CHOI, K.-J., AND KO, H.-S. 2002. Stable but responsive cloth. ACM Trans. Graph. 21, 3, 604–611.

DAVIET, G., BERTAILS-DESCOUBES, F., AND BOISSIEUX, L. 2011. A hybrid iterative

- solver for robustly capturing coulomb fricción in hair dynamics. ACM Trans. Graph. 30, 6, 139:1– 139:12.
- DE JOYA, J.M., NARAIN, R., O'BRIEN, J., SAMII, A., AND ZORDAN, V. Berkeley garment library. <http://graphics.berkeley.edu/resources/GarmentLibrary/>.
- 5 DUAN, Y., KEEFE, M., BOGETTI, T. A., AND POWERS, B. 2006. Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric. International Journal of Mechanical Sciences 48, 1, 33–43.
- ETZMUSS, O., KECKEISEN, M., AND STRASSER, W. 2003. A fast finite element solution for cloth modelling. In Proceedings of Pacific Graphics 2003, 244–251.
- 10 GOLDENTHAL, R., HARMON, D., FATTAL, R., BERCOVIER, M., AND GRINSPUN, E. 2007. Efficient simulation of inextensible cloth. ACM Trans. Graph. 26, 3, 49.
- GOLDSTEIN, H., POOLE, C. P., AND SAFKO, J. L. 2001. Classical Mechanics (3rd Edition), 3 ed. Addison-Wesley.
- GRINSPUN, E., HIRANI, A. N., DESBRUN, M., AND SCHRÖDER, P. 2003. Discrete
- 15 shells. In Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation 2003, 6267.
- HARMON, D., VOUGA, E., SMITH, B., TAMSTORF, R., AND GRINSPUN, E. 2009. Asynchronous contact mechanics. ACM Trans. Graph. 28, 3, 97.
- HEARLE, J. W. S., GROSBURG, P., AND BACKER, S. 1969. Structural Mechanics of
- 20 Fibers, Yarns, and Fabrics, vol. 1. JohnWiley & Sons Inc, New York.
- JAKOB, W., 2010. Mitsuba renderer. <http://www.mitsubarenderer.org>.
- KALDOR, J. M., JAMES, D. L., AND MARSCHNER, S. 2008. Simulating knitted cloth at the yarn level. ACM Trans. Graph. 27, 3, 65:165:9.
- KALDOR, J. M., JAMES, D. L., AND MARSCHNER, S. 2010. Efficient yarn-based cloth with
- 25 adaptive contact linearization. ACM Trans. Graph. 29, 4, 105:1–105:10.
- KAWABATA, S., NIWA, M., AND KAWAI, H. 1973. The finitedeformation theory of plain-weave fabrics part i: The biaxialdeformation theory. Journal of the Textile Institute 64, 1, 21–46.

KAWABATA, S. 1980. 'The Standardization and Analysis of Hand Evaluation'. Textile Machinery Society of Japan, 1980.

KING, M. J., JEARANAISILAWONG, P., AND SOCRATE, S. 2005. A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics. *International Journal of Solids and Structures* 42, 13, 3867–3896.

LOPEZ-MORENO, J., CIRIO, G., MIRAUT, D., AND OTADUY, M.A. 2014. GPU Visualization and Voxelization of Yarn-Level Cloth. *Proceedings of the Spanish Computer Graphics Conference*.

MCGLOCKTON, M. A., COX, B. N., AND MCMEEKING, R. M. 2003. A binary model of textile composites: III high failure strain and work of fracture in 3D weaves. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 51, 8, 1573–1600.

METAAPHANON, N., BANDO, Y., CHEN, B.-Y., AND NISHITA, T. 2009. Simulation of tearing cloth with frayed edges. *Comput. Graph. Forum* 7, 1837–1844.

MIGUEL, E., BRADLEY, D., THOMASZEWSKI, B., BICKEL, B., MATUSIK, W., OTADUY, M. A., AND MARSCHNER, S. 2012. Data-driven estimation of cloth simulation models. *Comp. Graph. Forum* 31, 519–528.

MIGUEL, E., TAMSTORF, R., BRADLEY, D., SCHVARTZMAN, S. C., THOMASZEWSKI, B., BICKEL, B., MATUSIK, W., MARSCHNER, S., AND OTADUY, M. A. 2013. Modeling and estimation of internal fricción in cloth. *ACM Trans. Graph.* 32,

6, 212:1–212:10.

NADLER, B., PAPADOPOULOS, P., AND STEIGMANN, D. J. 2006. Multiscale constitutive modeling and numerical simulation of fabric material. *International Journal of Solids and Structures* 43, 2, 206 – 221.

NARAIN, R., SAMII, A., AND O'BRIEN, J. F. 2012. Adaptive anisotropic remeshing for cloth simulation. *ACM Trans. Graph.* 31, 6, 152:1–152:10.

NG, S.-P., TSE, P.-C., AND LAU, K.-J. 1998. Numerical and experimental determination of in-plane elastic properties of 2/2 twill weave fabric composites. *Composites Part B: Engineering* 29, 6, 735–744.

O'BRIEN, J. F., AND HODGINS, J. K. 1999. Graphical modeling and animation of brittle

fracture. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 99, 137146.

PAGE, J., AND WANG, J. 2000. Prediction of shear force and an analysis of yarn slippage for a plain-weave carbon fabric in a bias extension state. *Composites Science and Technology* 60, 7, 977 – 986.

- 5 PAI, D. K. 2002. Strands: Interactive simulation of thin solids using cosserat models. *Comput. Graph. Forum* 21, 3, 347–352.

PARSONS, E. M., WEERASOORIYA, T., SARVA, S., AND SOCRATE, S. 2010. Impact of woven fabric: Experiments and mesostructure-based continuum-level simulations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 58, 11, 1995–2021.

- 10 PARSONS, E. M., KING, M. J., AND SOCRATE, S. 2013. Modeling yarn slip in woven fabric at the continuum level: Simulations of ballistic impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 61, 1, 265–292.

PEIRCE, F. T. 1937. The geometry of cloth structure. *Journal of the Textile Institute Transactions* 28, 3, T45–T96.

- 15 PFAFF, T., NARAIN, R., DE JOYA, J. M., AND O'BRIEN, J. F. 2014. Adaptive tearing and cracking of thin sheets. *ACM Trans. Graph.* 33, 4, 110:1–9.

PROVOT, X. 1995. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In *In Graphics Interface*, 147– 154.

- 20 REESE, S. 2003. Anisotropic elastoplastic material behavior in fabric structures. In *IUTAM Symposium on Computational Mechanics of Solid Materials at Large Strains*, 201–210.

SPILLMANN, J., AND TESCHNER, M. 2007. CoRdE: cosserat rod elements for the dynamic simulation of one-dimensional elastic objects. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation 2007*, 6372.

- 25 SPILLMANN, J., AND TESCHNER, M. 2009. Cosserat nets. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15, 2, 325 –338.

SUEDA, S., JONES, G. L., LEVIN, D. I. W., AND PAI, D. K. 2011. Large-scale dynamic simulation of highly constrained strands. *ACM Trans. Graph.* 30, 4, 39:1–10.

SULLIVAN, J. M. 2008. Curves of finite total curvature. In *Discrete Differential Geometry*, A.

- I. Bobenko, J. M. Sullivan, P. Schröder, and G. M. Ziegler, Eds., vol. 38 of Oberwolfach Seminars. Birkhäuser, Basel, 137–161.
- TANG, M., TONG, R., NARAIN, R., MENG, C., AND MANOCHA, D. 2013. A GPU-based streaming algorithm for high-resolution cloth simulation. *Computer Graphics Forum* 32, 7, 21–30.
- TERZOPOULOS, D., PLATT, J., BARR, A., AND FLEISCHER, K. 1987. Elastically deformable models. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 87*, 205–214.
- TESCHNER, M., HEIDELBERGER, B., MUELLER, M., POMERANETS, D., AND GROSS, M. 2003. Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects. 47–54.
- VOLINO, P., COURCHESNE, M., AND MAGNENAT THALMANN, N. 1995. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 95*, 137–144.
- VOLINO, P., MAGNENAT-THALMANN, N., AND FAURE, F. 2009. A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation. *ACM Trans. Graph.* 28, 4, 105:1–105:16.
- WANG, H., O'BRIEN, J. F., AND RAMAMOORTHY, R. 2011. Data-driven elastic models for cloth: modeling and measurement. *ACM Trans. Graph.* 30, 4, 71:1–71:12.
- XIA, W., AND NADLER, B. 2011. Three-scale modeling and numerical simulations of fabric materials. *International Journal of Engineering Science* 49, 3, 229–239.
- YAMANE, K., AND NAKAMURA, Y. 2006. Stable penalty-based model of frictional contacts. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 2006*, 1904–1909.

Descripción de la invención

El comportamiento de las mecánicas a gran escala del tejido entretejido está determinado por las propiedades mecánicas de los hilos, el patrón de entretejido y el contacto de fricción entre los hilos. Usando los métodos de simulación convencionales para los modelos de varilla elástica y el manejo de contacto hilo a hilo, se considera intratable la simulación de prendas entretejidas a densidades de hilos realistas. La presente invención introduce una solución eficiente para simular un tejido entretejido a nivel de hilo, usando una nueva

especificación de hilos entrelazados en base a cruces de hilos y deslizamiento de hilos, lo que permite el modelado de contacto hilo a hilo implícitamente, evitando la manipulación de contacto en los cruces de hilos completos. En combinación con los modelos para las fuerzas de hilo internas y el contacto por fricción entre hilos, así como un solucionador masivamente paralelo, la presente invención es capaz de simular prendas con cientos de miles de cruces de hilos a intervalos de trama prácticos en una máquina de escritorio, mostrando las combinaciones de los efectos a gran escala y a escala fina inducidos por la mecánica a nivel de hilo.

Un primer aspecto de la presente invención se refiere a un método implementado por ordenador para simular el comportamiento de un tejido entretejido a nivel de hilo. El método comprende:

- recuperar la información estructural de un tejido entretejido, incluyendo dicha información estructural al menos la distribución de los hilos de urdimbre, los hilos de trama y los nudos de cruce de hilos del tejido entretejido;

- aplicar las condiciones límite en una pluralidad de etapas de tiempo;

- describir cada nudo de cruce de hilos del tejido entretejido por una coordenada de posición 3D y dos coordenadas de deslizamiento, la coordenada de deslizamiento de urdimbre y la coordenada de deslizamiento de trama, que representan respectivamente el deslizamiento de los hilos de urdimbre y de trama;

- medir las fuerzas en cada nudo de cruce de hilos en base a un modelo de fuerza, midiéndose las fuerzas tanto en la coordenada de posición 3D como en las coordenadas de deslizamiento de los nudos de cruce de hilo;

- calcular el movimiento de cada nudo de cruce de hilos en una pluralidad de etapas de tiempo usando unas ecuaciones de movimiento derivadas que usan las ecuaciones de Lagrange-Euler, e integradas de forma numérica a través del tiempo, en que las ecuaciones de movimiento representan la densidad de masa distribuida de manera uniforme a lo largo de los hilos, así como las fuerzas medidas y las condiciones límite.

Las condiciones de contorno se establecen como las fuerzas externas en los nudos de cruce de hilos, o como el movimiento de un objeto o una persona que interactúa con el tejido entretejido, en el que las fuerzas entre el objeto/persona y el tejido se miden en los nudos de cruce de hilos en contacto.

La distribución de los hilos de urdimbre, los hilos de trama y los nudos de cruce de hilos del tejido entretejido incluye las direcciones de los hilos y su densidad. La distancia entre hilos puede obtenerse directamente de la distribución de los hilos.

La información estructural del tejido entretejido puede incluir además cualquiera de la siguiente información:

- un patrón 2D del tejido entretejido, que incluye localizaciones de paneles y de costura;
- la distribución de los hilos de urdimbre, los hilos de trama y los nudos de cruce de hilos para cada panel;
- el patrón de entretejido del tejido entretejido para cada panel;
- las densidades de hilo y los anchos para todos los diferentes tipos de hilo usados en el tejido entretejido;
- los parámetros mecánicos para todos los diferentes tipos de hilos usados en el tejido entretejido, incluyendo dichos parámetros mecánicos al menos alguno de los siguientes:

- el módulo elástico,
- el módulo de flexión,
- el módulo de contacto de tundido,
- el coeficiente de fricción de deslizamiento,
- la relación de amortiguamiento a masa,
- la relación de amortiguamiento a elasticidad.

La información estructural recuperada del tejido entretejido incluye, preferentemente, el coeficiente de fricción de deslizamiento de los hilos, y el modelo de fuerza incluye las fuerzas de fricción de deslizamiento usando el coeficiente de fricción de deslizamiento y las coordenadas de deslizamiento.

En una realización preferida, la información estructural recuperada del tejido entretejido incluye la rigidez de los hilos, y el modelo de fuerza incluye el contacto entre los hilos paralelos adyacentes usando las coordenadas de deslizamiento, la rigidez de los hilos y la distancia entre hilos obtenida a partir de la distribución de los hilos.

Aún en una realización preferida, la información estructural recuperada del tejido entretejido incluye el módulo elástico de los hilos, y el modelo de fuerza incluye las fuerzas de estiramiento. La información estructural recuperada del tejido entretejido puede incluir también el módulo de flexión de los hilos, incluyendo el modelo de fuerza las fuerzas de flexión. El modelo de fuerza puede usar también una compresión normal entre hilos en los cruces de hilos usando los componentes normales de estiramiento y las fuerzas de flexión.

La información estructural recuperada del tejido entretejido incluye preferentemente el módulo de contacto de tundido de los hilos, y el modelo de fuerza incluye las fuerzas de tundido.

10 Un aspecto adicional de la presente invención se refiere a un sistema para simular el comportamiento de un tejido entretejido a nivel de hilo, comprendiendo el sistema:

- medios de almacenamiento de datos para almacenar la información estructural de un tejido entretejido, incluyendo dicha información estructural al menos la distribución de los hilos de urdimbre, los hilos de trama y los nudos de cruce de hilos del tejido entretejido; y

15 - medios de procesamiento de datos configurados para:

• recuperar dicha información estructural,

• aplicar las condiciones límite en una pluralidad de etapas de tiempo,

20 • describir cada nudo de cruce de hilos del tejido entretejido por una coordenada de posición 3D y dos coordenadas de deslizamiento, la coordenada de deslizamiento de urdimbre y la coordenada de deslizamiento de trama, que representan respectivamente el deslizamiento de los hilos de urdimbre y de trama;

• medir las fuerzas en cada nudo de cruce de hilos en base a un modelo de fuerza, midiéndose las fuerzas tanto en la coordenada de posición 3D como en las coordenadas de deslizamiento de los nudos de cruce de hilo;

25 • calcular el movimiento de cada nudo de cruce de hilos en una pluralidad de etapas de tiempo usando unas ecuaciones de movimiento derivadas que usan las ecuaciones de Lagrange-Euler, e integradas de forma numérica a través del tiempo, en que las ecuaciones de movimiento representan la densidad de masa distribuida de manera uniforme a lo largo de los hilos, así como las fuerzas medidas y las condiciones límite.

Un aspecto adicional de la presente invención se refiere a un producto de programa de ordenador para simular el comportamiento de un tejido entretejido a nivel de hilo. El producto de programa de ordenador comprende un código de programa que puede usarse para realizar las etapas del método implementado por ordenador anteriormente definidas. El producto de programa de ordenador se almacena preferentemente en un medio de soporte del programa, tal como un CD, un DVD, una tarjeta de memoria o un disco duro.

El aspecto clave del método de simulación del tejido entretejido a nivel de hilo es una especificación centrada en los cruces de hilos, que consiste en la posición 3D del punto de cruce más dos grados de libertad adicionales para capturar el deslizamiento del hilo, siguiendo la especificación de varilla de Eulerian de Sueda et al. [2011]. El contacto entre hilos se maneja de forma implícita, y se evita por completo el cálculo de la detección de colisiones y la respuesta de colisión entre los hilos de cruce.

En base a la especificación propuesta, se formulan modelos de fuerza para la mecánica de hilo de bajo nivel. Estos incluyen fuerzas de estiramiento y de flexión de los hilos individuales. Pero, lo más importante, la nueva especificación permite formulaciones simples de las fuerzas de contacto entre hilos, especialmente la fricción de deslizamiento en los cruces de hilos y el contacto entre los hilos paralelos adyacentes. Efectos interesantes, tales como la plasticidad a nivel de hilo o la influencia del patrón de entretejido en el comportamiento a gran escala se obtienen de forma natural gracias a la mecánica a nivel de hilo.

Para simular de forma robusta una tela a nivel de hilo, se aplica una integración implícita a las ecuaciones de la dinámica. Se ha diseñado un solucionador masivamente paralelo que potencia el patrón de entretejido, así como una nueva especificación. Con la implementación GPU, puede simularse una tela con más de 300 K nudos y 2 K hilos en poco más de 2 minutos/marco (donde una trama es de 1/24 de un segundo) en una máquina de escritorio.

La predicción del drapeado de prenda toma como entrada los siguientes parámetros:

- Una distribución 2D de los patrones de prendas, que indican qué partes de los límites del patrón constituyen las costuras. Un patrón 2D de un tejido entretejido incluye la distribución de los paneles de tejido y cómo se cosen estos paneles (localizaciones de las costuras).

- Las direcciones de los hilos de urdimbre y de trama en los patrones 2D.

- Unas densidades en ambas direcciones de urdimbre y de trama.

- El patrón de tejido, es decir, ligamento tafetán, sarga, satén, etc. El patrón de tejido indica a cada cruce de hilos que hilo, de urdimbre o de trama, está en la parte superior.

- Anchos de hilo para todos los diferentes tipos de hilos usados en la prenda.

- Parámetros mecánicos para todos los diferentes tipos de hilo usados en la prenda.

5 Estos parámetros incluyen:

- Un módulo elástico.

- Un módulo de flexión.

- Un módulo de contacto de tundido.

- Un coeficiente de fricción de deslizamiento.

10 • Una relación de amortiguamiento a masa y una relación de amortiguamiento a elasticidad.

Los parámetros mecánicos pueden obtenerse realizando unas pruebas de Kawabata de estiramiento, tundido y flexión [Kawabata 1980], y a continuación ajustar los valores de parámetro para las curvas de fuerza-deformación medidas.

La presente invención consigue simulaciones eficientes a nivel de hilo de tela entretejida, con alta resolución y un tiempo corto de cálculo, prediciendo el comportamiento mecánico y visual de cualquier clase de tela entretejida. La invención sustituye los modelos continuos, modelos basados en especificaciones de elementos finitos de hilos volumétricos y modelos a nivel de hilo que representan los hilos de urdimbre y de trama de forma separada, resolviendo el contacto entre ellos. La presente invención predice de una manera robusta, realista y eficiente, el comportamiento de toda una tela empezando desde el comportamiento de los hilos individuales.

La invención proporciona las siguientes ventajas en el sector textil:

- Costes reducidos, aumento de la productividad y mayor flexibilidad en el diseño y la innovación de los tejidos textiles. El rendimiento de nuevos tejidos puede evaluarse en prototipos simulados.

- La realización de análisis textiles para evaluar el diseño equivocado de los productos.

- La realización de animaciones de alta calidad de las nuevas prendas para fines de

marketing.

La invención puede aplicarse en diferentes sectores:

- Diseño de tejidos textiles.
- Diseño de moda y telas.
- 5 - Comercialización de telas.
- Sector del automóvil: artículos de tapicería textil.
- Medicina: tejidos entretejidos para fabricar estents, etc.

Breve descripción de las figuras

10 A continuación, se describen brevemente una serie de figuras que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención, que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

Las figuras 1A, 1B y 1C muestran diferentes patrones de entretejido con hilos flotantes aumentados: liso, sarga y satén.

15 La figura 2 representa un gráfico que relaciona la fuerza en relación con el ángulo de tundido para los tres ejemplos de sábana colgante de la figura 1.

Las figuras 3A-3C muestran los modelos de hilos entretejidos usados en la presente invención: los hilos volumétricos 3D (figura 3A), los segmentos de varilla entrelazados con rizado (figura 3B), los segmentos de varilla que cruzan en nudos de cruce de 5-DoF (figura 3C).

20 La figura 4A muestra unos hilos de urdimbre y de trama que se cruzan en un nudo q_0 , y los cuatro cruces de hilos adyacentes. La figura 4B muestra el ángulo θ de curvatura entre dos segmentos de urdimbre adyacentes. La figura 4C representa las fuerzas que producen una compresión normal en un nudo de cruce. La figura 4D representa el ángulo α de tundido y el ángulo α_j de interferencia de tundido entre dos hilos de urdimbre y de trama adyacentes.

25 Las figuras 5A y 5B muestran los efectos de fricción de tundido, en los que la muestra se estira (figura 5) y a continuación se relaja (figura 5B), dejando una arruga persistente.

La figura 6 muestra una tabla con los valores de parámetro usados en los ejemplos.

La figura 7 muestra una tabla con un coste medio por etapa de tiempo (en milisegundos) para los ejemplos, desglosado por etapa.

La figura 8 muestra un ejemplo de camiseta sin mangas con 2.023 hilos y 350.530 nudos de cruce, mostrando grandes movimientos así como pliegues y arrugas de pequeña escala.

5 La figura 9 muestra un ejemplo de camisa larga con 3.199 hilos y 559.241 nudos de cruce.

La figura 10 muestra un ejemplo de simulación a nivel de hilo de un enganche producido en una camisa con 2.023 hilos y 350.530 nudos de cruce, tirando de un nudo de costura.

10 Las figuras 11A-11C muestran un ejemplo de un enganche producido en la zona del vientre de la camiseta sin mangas de la figura 8. La figura 11A muestra un enganche formado tirando de dos hilos mientras que se bloquea el movimiento hacia fuera de la tela. La figura 11B representa un enganche real bajo condiciones similares. La figura 11C muestra un primer plano del enganche de la figura 11A.

La figura 12 muestra la camiseta sin mangas de la figura 8 desgarrada agarrando algunos nudos y separándolos. Los hilos se desprenden y los bordes se deshilachan en el proceso.

15 Las figuras 13A y 13B, muestran una sábana de ligamento tafetán de 100 hilos por pulgada (1 millón de nudos de cruce). Aparecen pequeñas arrugas durante el movimiento (figura 13A) hasta que la sábana queda en reposo exhibiendo grandes arrugas drapeadas (figura 13B).

Descripción de una realización preferida de la invención

20 En primer lugar, se describirá cómo construir modelos de telas en base a hilos. A continuación, se presentará la característica clave de nuestro modelo de tela en base a hilo: la especificación de la cinemática del hilo en base a las posiciones de los puntos de cruce de hilos y el deslizamiento de hilo. Por último, se perfilará la formulación de las ecuaciones de movimiento en base a esta especificación.

25 Para construir prendas a nivel de hilo, se sigue un enfoque de adaptación. Se toma como entrada el patrón 2D que forma una prenda, colocando hilos de urdimbre y de trama como líneas rectas ortogonales en cada panel 2D de forma independiente, a una distancia L entre hilos. En cada costura se coloca un hilo adicional, y los hilos de trama y de urdimbre se conectan a los hilos de costura compartiendo los nudos. En los límites de la tela puede
30 elegirse entre añadir hilos de costura o dejar que las terminaciones de hilo cuelguen

libremente. Los modelos de tela 3D pueden obtenerse automáticamente a partir de los patrones comerciales [Berthouzoz et al. 2013], por lo tanto, el presente proceso de modelado también puede automatizarse fácilmente.

Un hilo flotante constituye un hueco entre dos hilos del mismo tipo en el que no se entrelaza el otro hilo. Diferentes patrones de entretejido, tales como el ligamento tafetán (sin hilos flotantes), la sarga, el satén, etc. se obtienen variando la distribución de los hilos flotantes, lo que afecta a la mecánica del tejido resultante. Las **figuras 1A, 1B y 1C** muestran, respectivamente, diferentes patrones de entretejido con hilos flotantes aumentados: el patrón de ligamento tafetán (figura 1A), el patrón de sarga (figura 1B) y el patrón de satén (figura 1C.). Más hilos flotantes conducen a una resistencia de tundido más baja, por lo tanto, la tela cae más abajo cuando se cuelga de dos esquinas.

Para modelar el patrón de entretejido, se elige una orientación arbitraria para cada panel, almacenando en cada cruce de hilos un indicador que indica qué hilo, de urdimbre o de trama, está en la parte superior. Esta simple estrategia permite modelar el ligamento tafetán, la sarga, el satén, y todos los demás tejidos comunes. La **figura 2** representa un gráfico que relaciona la fuerza (en N) con respecto al ángulo de tundido (en radianes) para los tres ejemplos de sábanas colgantes de las figuras 1A, 1B y 1C. La fuerza de tundido, la fricción y la interferencia son claramente visibles, así como los diferentes comportamientos según el patrón de entretejido.

En la representación cinemática se ignora el volumen de los hilos, y todos los hilos se inicializan planos en el mismo plano. Sin embargo, se contabiliza para el fin del cálculo de la fuerza y la reproducción del volumen de los hilos. Las **figuras 3A, 3B y 3C** muestran los modelos de los hilos de tejido (hilos 1 de urdimbre e hilos 2 de trama) usados en la presente invención. El rizado es la flexión introducida en los hilos de urdimbre 1 y/o de trama 2 para permitir el entrelazado, como se muestra en la figura 3A. El rizado también produce fuerzas de compresión entre los hilos entrelazados, y esta compresión permite la existencia de fuerzas de fricción que sujetan el tejido entre sí. En la presente implementación, el rizado se aplica tanto a los hilos de trama 2 como a los de urdimbre 1, desplazándoles el radio R del hilo en direcciones opuestas, como se muestra en la figura 3B. La presente aplicación podría ampliarse para permitir un rizado anisotrópico. Los hilos volumétricos 3D mostrados en la figura 3A de una pieza de tejido se sustituyen por segmentos de varilla entrelazados con rizado (figura 3B) para el cálculo de la fuerza normal, y por cruces de segmentos de varilla en los nudos 3 de cruce de 5 grados de libertad (5-DoF) (figura 3C) para todo lo demás. El aspecto volumétrico se restablece en la reproducción.

Para facilitar la presentación, se asume que la distancia L entre hilos y el radio R de hilo son los mismos para la urdimbre 1 y la trama 2, pero es trivial relajar este supuesto, y de hecho la presente implementación soporta la tela anisotrópica.

En las telas entretejidas, la gran mayoría de los hilos están en contacto con los cruces de hilo, de manera que en general puede asumirse que tales contactos se mantienen a lo largo de la simulación. El movimiento de la tela podría describirse como un problema de dinámica restringida, con una especificación en base a nudos de hilos, más un gran número de restricciones de contacto que mantienen una distancia cero entre los hilos en los cruces de hilo. Pero se ha observado que, en lugar de detectar y resolver tales contactos, es completamente más eficiente elegir una especificación conveniente en base a los cruces de hilo.

La **figura 4A** muestra unos hilos de urdimbre 1 y de trama 2 que se cruzan en el nudo q_0 , y los cuatro cruces de hilos adyacentes (q_1, q_2, q_3, q_4). Los hilos de urdimbre 1 y de trama 2 se parametrizan en base a su longitud de arco no deformada, u y v respectivamente. Por lo tanto, u es la longitud no deformada del hilo (1) de urdimbre entre el punto (3) de cruce y un punto extremo del hilo; y v es la longitud no deformada del hilo (2) de trama entre el punto (3) de cruce y un punto extremo del hilo. A continuación, se describe un cruce de hilos mediante su posición 3D, x , y las coordenadas paramétricas de los puntos materiales de urdimbre 1 y de trama 2 en el cruce de hilos. La variación de los modelos de coordenadas u y v , respectivamente, el deslizamiento de los hilos de urdimbre y de trama. Un cruce de hilos se considera como un nudo 5-DoF con 3 DoF de Lagrange y 2 DoF de Euler. Se indican las coordenadas $\mathfrak{X}^5$ del nudo de cruce de hilos i^{th} como $q_i \equiv (x_i, u_i, v_i)$.

Con el presente documento se propone especificar una tela entretejida con una combinación de nudos de cruce de hilos 5-DoF y nudos 3-DoF regulares. Se establece un nudo 5-DoF en cada cruce de hilos, y los nudos 3-DoF regulares en los puntos extremos de los hilos. La figura 4A muestra una configuración habitual con un nudo 3 de cruce de hilos y sus cuatro nudos adyacentes.

Dado un segmento $[q_0, q_1]$ de urdimbre (y de manera similar para los segmentos de trama), las posiciones se interpolan de forma lineal según la longitud u del arco. A continuación, la posición 3D de un punto dentro del segmento se da por:

$$\mathbf{x}(u) = \frac{u_1 - u}{\Delta u} \mathbf{x}_0 + \frac{u - u_0}{\Delta u} \mathbf{x}_1, \quad (1)$$

donde $\Delta u = u_1 - u_0$ es la restante longitud del segmento.

La velocidad de un punto en el interior del segmento depende de las velocidades de los puntos de cruce de hilos, pero también del deslizamiento de hilo, y se sigue por la ecuación (1) de diferenciación:

$$\dot{\mathbf{x}}(u) = \frac{u_1 - u}{\Delta u} (\dot{\mathbf{x}}_0 - \dot{u}_0 \mathbf{w}) + \frac{u - u_0}{\Delta u} (\dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{u}_1 \mathbf{w}), \quad (2)$$

donde $\mathbf{w} = \frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0}{\Delta u}$.

Concatenando las coordenadas de todos los cruces de hilos, se define un vector de las coordenadas q generalizadas. A continuación, las ecuaciones de movimiento pueden derivarse usando las ecuaciones de Lagrange-Euler [Goldstein et al. 2001]. La energía cinética es $T = 1/2 \dot{q}^T M \dot{q}$, con una matriz M de masa generalizada, V indica la energía potencial, y ∇ indica el gradiente generalizado. A continuación, las ecuaciones de Lagrange-Euler pueden escribirse como

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} = \nabla T - \nabla V - \dot{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{q}}. \quad (3)$$

Se asume que la masa se distribuye uniformemente a lo largo de los hilos, con densidad ρ . A continuación, siguiendo la ecuación (2) de la velocidad para un punto arbitrario en un segmento de urdimbre, la energía cinética del segmento $[q_0, q_1]$ (y de forma similar para un segmento de trama) es:

$$T_{0,1} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0^T & \dot{u}_0 & \dot{\mathbf{x}}_1^T & \dot{u}_1 \end{pmatrix} \mathbf{M}_{0,1} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0 \\ \dot{u}_0 \\ \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \dot{u}_1 \end{pmatrix}, \text{ con} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{0,1} = \frac{1}{6} \rho \Delta u \begin{pmatrix} 2\mathbf{I}_3 & -2\mathbf{w} & \mathbf{I}_3 & -\mathbf{w} \\ -2\mathbf{w}^T & 2\mathbf{w}^T \mathbf{w} & -\mathbf{w}^T & \mathbf{w}^T \mathbf{w} \\ \mathbf{I}_3 & -\mathbf{w} & 2\mathbf{I}_3 & -2\mathbf{w} \\ -\mathbf{w}^T & \mathbf{w}^T \mathbf{w} & -2\mathbf{w}^T & 2\mathbf{w}^T \mathbf{w} \end{pmatrix} \quad (5)$$

La energía V potencial incluye múltiples términos, tales como las fuerzas internas conservadoras y de gravedad. La gravedad se define, por ejemplo, para el segmento $[q_0, q_1]$ de urdimbre como

$$V_{0,1} = \rho \Delta u \mathbf{g}^T \frac{\mathbf{x}_0 + \mathbf{x}_1}{2} \quad (6)$$

A continuación, se trata en detalle la formulación de las fuerzas internas. Además de las fuerzas conservadoras derivadas de los potenciales de energía, también se incorporan otros términos de fuerza directamente a la parte derecha de las ecuaciones (3) de Euler-Lagrange, tales como la fricción y fuerzas de contacto. También se incorpora la amortiguación a través del modelo de amortiguación de Rayleigh que usa una relación de amortiguación a masa y una relación de amortiguación a elasticidad como parámetros, con términos de masa y rigidez proporcionales controlados por los parámetros α y β , respectivamente.

- 10 Para el modelo de fuerza se consideran dos tipos de fuerzas internas en la tela entretejida. La fuerza debida a la deformación de los hilos individuales incluye unas fuerzas de estiramiento y de flexión. La torsión del hilo no se considera, ya que su efecto es mínimo en la tela. A continuación, se describirán las fuerzas internas debidas al contacto entre los hilos entrelazados, que incluyen una compresión normal, una fricción deslizando, un tundido y un
15 contacto entre hilos paralelos.

Las fuerzas conservativas se describen de una manera concisa usando los potenciales de energía. En el caso general, estos potenciales producirán fuerzas tanto en los puntos de cruce de hilos como en las coordenadas de deslizamiento. Además, la aplicación de la integración numérica necesita del cálculo de los jacobinos de fuerza, que incluyen los
20 términos mixtos en relación con los puntos de cruce y las coordenadas de deslizamiento.

Para modelar el estiramiento, se sigue el enfoque de Spillmann et al. [2007], que define una energía de estiramiento que es cuadrática en el esfuerzo a lo largo de la línea central del hilo. Con la presente especificación, el esfuerzo de estiramiento es constante en cada segmento del hilo. Para el segmento $[q_0, q_1]$ de urdimbre, es simplemente $\varepsilon = \|\mathbf{w}\| - 1$. A
25 continuación, la energía de estiramiento del segmento para una rigidez k_s puede calcularse como:

$$V_{0,1} = \frac{1}{2} k_s \Delta u (\|\mathbf{w}\| - 1)^2 \quad (7)$$

donde $k_s = Y\pi R^2$ e Y es el módulo elástico. A menudo, los hilos de tela entretejida están cercanos a ser inextensibles, lo que requiere el uso de un módulo elástico alto. Una

alternativa sería ejecutar la inextensibilidad a través de las restricciones y los multiplicadores de Lagrange. Sin embargo, se ha diseñado un solucionador para la integración implícita para la presente implementación, que se describirá en detalle más adelante y que permite la simulación eficiente de los hilos rígidos.

- 5 Para el modelo de flexión, se toma un enfoque de geometría diferencial específica, definiendo las energías de flexión en base a curvaturas específicas en los cruces de hilo, de forma separada para los hilos de urdimbre y de trama. Existen varias definiciones posibles de curvatura específica en los cruces de hilos [Sullivan 2008], pero se define en el presente documento simplemente como el ángulo entre los segmentos de hilo. Esta curvatura se
 10 transforma en una densidad de curvatura dividiéndola por la longitud del arco entre los centros de segmento. Para el hilo 1 de urdimbre en la **figura 4B**, dado un ángulo θ , entre los segmentos $[q_2, q_0]$ y $[q_0, q_1]$, la densidad de curvatura en el nudo q_0 se define como $k = \frac{2\theta}{u_1 - u_2}$. Se define una densidad de energía de flexión con rigidez k_b que es cuadrática en la curvatura. Integrándola sobre los medios segmentos adyacentes a q_0 da como
 15 resultado una energía de flexión específica

$$V_{2,0,1} = k_b \frac{\theta^2}{u_1 - u_2}, \quad (8)$$

- donde $k_b = B\pi R^2$, y B es el módulo de flexión. La expresión podría convertirse numéricamente inestable si los cruces de hilos llegan a estar arbitrariamente cerca. Sin embargo, esto no sucede en la práctica debido al modelo de contacto entre los hilos
 20 paralelos descrito más adelante. Bergou et al. [2008] elige una curvatura de métrica específica diferente, en base a la tangente del ángulo entre los segmentos. La energía resultante crece hasta el infinito si un hilo se flexiona por completo, y esto también crea una resistencia excesiva a la flexión en la práctica. Sin embargo, otra opción es usar una métrica de curvatura específica en base al seno del ángulo medio entre los segmentos, pero esta
 25 métrica produce una energía de flexión no convexa.

- La tela entretejida se mantiene unida por la fricción entre hilos, y las fuerzas de fricción admisibles son una función de la compresión normal entre hilos en los cruces de hilo. La especificación de hilo presente ignora el movimiento relativo entre los hilos de urdimbre 1 y de trama 2 a lo largo de su dirección normal, por lo tanto, la compresión normal no puede
 30 modelarse como un potencial elástico. En su lugar, en el presente documento se propone

una aproximación cuasi-estática que captura los efectos de fricción deseados. En esencia, la fuerza de compresión se estima promediando los componentes normales de las fuerzas de urdimbre y de trama, representadas en la **figura 4C**, y a continuación esta compresión puede utilizarse para modelar las fuerzas de fricción y de tundido [Page y Wang 2000].

- 5 El cálculo detallado es como sigue. En cada cruce 3 de hilos, se calcula el plano que mejor se ajusta usando las posiciones del nudo y sus cuatro nudos adyacentes. Como la dirección normal, se elige la normal del plano que apunta desde el hilo 1 de urdimbre hacia el hilo 2 de trama. El rizado se aplica desplazando las posiciones de los puntos de urdimbre y de trama en la dirección normal por el radio del hilo (figura 3B), y se recalculan las fuerzas de flexión. En cada cruce de hilos, se estima la fuerza de compresión sumando los componentes normales de las fuerzas de estiramiento F_s y de flexión F_b (en la figura 4C, los superíndices + y - indican las direcciones positiva y negativa de los hilos), y promediando las fuerzas resultantes de las direcciones de urdimbre y de trama, es decir,

$$F_n = \frac{1}{2} \mathbf{n}^T (\mathbf{F}_s(u) + \mathbf{F}_b(u) - \mathbf{F}_s(v) - \mathbf{F}_b(v)) \quad (9)$$

- 15 Si la fuerza de compresión es negativa, se considera que los hilos deben separarse, y la fuerza se fija a cero. Sería posible extender este modelo para manejar la adherencia.

Debe tenerse en cuenta que se representan solo las fuerzas de estiramiento y las fuerzas de flexión. Si el tejido se estira, entonces la compresión está dominada por el estiramiento. Sin embargo, cuando no se estira, entonces está dominada por la flexión. Para una tela plana, es crucial representar los desajustes producidos por el rizado, de otro modo, las fuerzas de fricción no pueden sostener los hilos en su lugar, y esta es la razón por la que las fuerzas de flexión se recalculan después de desplazar los puntos de urdimbre y de trama.

En cada cruce de hilos, también se calculan las fuerzas de fricción que tratan de evitar el deslizamiento entre los hilos de urdimbre 1 y de trama 2. La fricción entre hilos se modela usando una aproximación en base a la penalización del modelo de Coulomb, similar al de Yamane y Nakamura [2006]. La especificación presente en base a los cruces de hilos simplifica en gran medida la formulación de la fricción, y un simple resorte en cada coordenada de deslizamiento produce resultados efectivos.

Proporcionando el cruce q_0 de hilos, se establece una posición $\bar{u}_0$ de anclaje en el hilo 1 de urdimbre, y de manera similar para el hilo 2 de trama. La posición de anclaje se inicializa

como el deslizamiento u_0 de urdimbre en el cruce. La fricción se modela como un resorte viscoelástico de longitud restante cero entre la posición de anclaje y la coordenada de urdimbre real.

El modelo de Coulomb establece un límite μF_n en el componente elástico de la fuerza de fricción, donde μ es el coeficiente de fricción de deslizamiento y F_n es la compresión entre hilos como se calcula en la ecuación (9) anterior. Si no se alcanza el límite, el contacto está en modo de varilla, y la fuerza se define por el resorte. Si se excede el límite, el contacto está en modo de deslizamiento, y la fuerza se proporciona por el límite de Coulomb. En resumen, la fuerza de fricción de urdimbre se calcula como:

$$F_{x0} = \begin{cases} -k_f (u_0 - \bar{u}_0) - d_f \dot{u}_0, & \text{varilla} \\ -\text{sign}(u_0 - \bar{u}_0) \mu F_n - d_f \dot{u}_0, & \text{deslizamiento} \end{cases} \quad (10)$$

Además, en el modo de deslizamiento se mantiene la posición de anclaje a una distancia constante de la coordenada de urdimbre, de manera que la fuerza de resorte resultante es igual al límite de Coulomb.

En los cruces 3 de hilos, los hilos de urdimbre 1 y de trama 2 adyacentes giran en la parte superior de uno al otro como una función del ángulo ϕ de tundido, como se muestra en la **figura 4D**. Este giro produce dos efectos: una compresión de hilo y una fricción de contacto. Además, los hilos de cruce entrelazados sufren interferencia cuando chocan.

Para capturar estos efectos, para cada par de segmentos de urdimbre y de trama en un cruce de hilos, se modela una fuerza de fricción angular y un potencial elástico que dependen del ángulo ϕ de tundido. Se considera, por ejemplo, el segmento $[q_0, q_1]$ de urdimbre y el segmento $[q_0, q_3]$ de trama en la figura 4D. Se define una densidad de energía de tundido proporcionada por el giro $\phi - \frac{\pi}{2}$ de tundido, integrándola sobre la incidencia de los dos medios segmentos en q_0 . En esta integración, se ha encontrado que es suficiente usar la distancia L entre hilos predeterminada. Esta aproximación tiene poco efecto en la práctica y elimina la necesidad de calcular las fuerzas de tundido y sus jacobinos para las coordenadas de deslizamiento. La energía de tundido resultante con rigidez k_x es

$$V_{0,1,3} = \frac{1}{2} k_x L \left(\phi - \frac{\pi}{2} \right)^2 \quad (11)$$

donde $k_x = SR^2$, y S es el módulo de tundido de contacto.

La compresión normal aumenta la resistencia al tundido, y se modela este efecto haciendo de la rigidez de tundido una función de la fuerza de compresión, es decir, $k_x(F_n)$. Además, si se entrelaza o el segmento del hilo de urdimbre o de trama, se considera también una interferencia de tundido, modelada según las heurísticas siguientes. Se define el ángulo ϕ_j de interferencia de tundido como el ángulo en el que los puntos finales de los segmentos de urdimbre y de trama con radio R se tocan entre sí, es decir, $\phi_j = 2 \arcsin\left(\frac{R}{L}\right)$. La interferencia se modela como una no linealidad sólida en la rigidez de tundido, dejándola como una constante para los ángulos de tundido por encima del ángulo de interferencia, y haciéndola crecer cúbicamente para ángulos más pequeños.

La fricción de tundido puede modelarse usando un resorte angular entre el ángulo ϕ de tundido actual y un ángulo $\bar{\phi}$ de anclaje, siguiendo el mismo enfoque que para la fricción de deslizamiento descrita anteriormente. Se aplica una fuerza de fricción de tundido solo a la posición de los nudos de cruce de hilos, y puede calcularse para cada uno de los tres nudos q_i en el ejemplo de la figura 4D como:

$$\mathbf{F}_{\phi i} = \begin{cases} -k_{f\phi} (\phi - \bar{\phi}) \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{x}_i} T, & \text{varilla} \\ -\text{sign}(\phi - \bar{\phi}) \mu_{\phi} F_n \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{x}_i} T, & \text{deslizamiento} \end{cases} \quad (12)$$

Uno de los efectos visuales de la fricción interna es la creación de arrugas persistentes, como se demuestra por Miguel y colaboradores [2013]. La **figura 5A** muestra una pequeña muestra de tejido que primero se estira y a continuación se relaja (**figura 5B**), dejando una arruga persistente a lo largo de la dirección de estiramiento debido a la fricción de tundido.

El contacto entre los hilos paralelos adyacentes puede modelarse fácilmente añadiendo una energía de penalización si dos cruces de hilos se acercan demasiado. Se define el umbral d de distancia como cuatro veces el radio del hilo si existe un hilo entrelazado entre los dos cruces, y como el doble del radio si los dos hilos forman un hilo flotante. Proporcionando, por ejemplo, los hilos de trama que pasan a través de q_0 y q_1 en la figura 4A, se define una densidad de energía en base a la distancia entre los puntos de cruce, y se integra esta densidad sobre la incidencia de los dos medios segmentos en ambos nudos. Suponiendo que los hilos son prácticamente inextensibles, la distancia entre los puntos de cruce puede aproximarse como la diferencia entre las coordenadas de deslizamiento de urdimbre. E igual

que para el tundido, se ha encontrado que era suficiente, para integrar la densidad de energía, usar la distancia L entre hilos predeterminada, eliminando de esta manera la necesidad de calcular fuerzas de acoplamiento complejas con las coordenadas de deslizamiento de trama. La energía de penalización resultante con rigidez k_c es:

$$V_{0,1} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_c L (u_1 - u_0 - d)^2, & \text{si } u_1 - u_0 < d \\ 0, & \text{si } u_1 - u_0 \geq d. \end{cases} \quad (13)$$

El contacto entre los hilos entrelazados se maneja implícitamente por la especificación presente, y el contacto entre los hilos paralelos adyacentes se maneja fácilmente como se ha descrito anteriormente. Por otro lado, el contacto con otros objetos, así como las auto-colisiones de largo alcance necesitan un procesamiento de colisión explícito. Pueden usarse los métodos existentes para detectar y resolver las colisiones. Como resumen, se define un volumen delgado alrededor de la tela, lo que permite calcular la profundidad de penetración y aplicar la respuesta de colisión a través de las energías de penalización.

Para detectar el contacto con objetos volumétricos, se usan campos de distancia. En los ejemplos más tarde comentados, solo se han usado los objetos rígidos o articulados, por lo tanto, ha sido suficiente para calcular el campo de distancia una vez como un preprocesamiento. Proporcionando un objeto O , en cada etapa de tiempo se consulta cada nudo x de hilo contra el campo de distancia de O , y se define una colisión si la distancia a O es menor que γ (En los ejemplos, γ es 4 veces el radio R del hilo). La información de colisión está formada por el punto x de cruce, el punto p más cercano en la superficie de O y un contacto n normal. Se ha usado la normal en p como contacto normal, aunque son posibles otras opciones.

Para detectar auto-colisiones, se definen pequeños elementos volumétricos en la superficie de la tela, y los nudos de hilo se consultan contra estos elementos volumétricos siguiendo el enfoque de Teschner et al. [2003]. Se forman dos triángulos con los 4 nudos definidos por cada dos pares hilos de urdimbre y de trama adyacentes, sobresaliendo los triángulos una distancia γ y en las direcciones de γ opuestas a la normal en cada punto de cruce para formar cada elemento volumétrico (la estimación de la normal se ha tratado anteriormente). Se consultan todos los nudos contra los triángulos salientes, revisando los AABB de los triángulos salientes en una malla regular para su selección [Teschner et al. 2003]. Si un punto x está dentro de un triángulo saliente, se define una colisión, encontrando el punto p saliente en la superficie, y calculando una normal n de contacto interpolando las normales

de los nudos del triángulo.

Para una respuesta de colisión, tanto con objetos externos como en auto-colisiones, se define una fuerza de penalización en el punto x de colisión, con una distancia $n^T(p - x) + \gamma$ de penalización, y la dirección n . En el caso de auto-colisión, también se distribuye la fuerza opuesta a los nudos que definen el triángulo, usando como pesos las coordenadas baricéntricas de p en el triángulo. Además de la respuesta de penalización, se aplica la fricción de Coulomb aproximada a través de los resortes sujetos [Yamane y Nakamura 2006].

La limitación obvia de la respuesta en base a la penalización de objetos delgados es la posibilidad de sufrir problemas de resurgimiento. En los ejemplos proporcionados a continuación, el resurgimiento se ha evitado sumando un término de amortiguación a la respuesta de penalización. Una solución más robusta sería usar un método barrera [Harmon et al. 2009].

Las ecuaciones de movimiento (3) se integran usando una integración implícita inversa de Euler [Baraff y Witkin 1998] con el método de Newton y un escalonamiento de tiempo adaptativo para asegurar la convergencia. En la práctica, la mayoría de las etapas resueltas necesitan solo una iteración de Newton, y se permiten hasta cinco antes de reducir a la mitad la etapa de tiempo. El coste de simulación está dominado por la solución de sistemas lineales del tipo $Av = b$, donde $v = \dot{q}$ es el vector de las velocidades generalizadas, y la

matriz de sistema se define como $A = M - \Delta t \frac{\partial F}{\partial v} - \Delta t^2 \frac{\partial F}{\partial q}$. Con la presente especificación en base a los cruces de hilos, A está formado por bloques de tamaño 5×5 .

El sistema lineal se resuelve usando el método residual conjugado (CR). Es más robusto que el método del gradiente conjugado (CG) para las matrices que están cerca del semi-definido, ya que calcula la solución de los cuadrados mínimos al problema lineal, a expensas de un coste ligeramente mayor y un consumo de memoria.

Una ventaja del modelo de tela a nivel de hilo presente es la fuerte regularidad de la matriz A del sistema, que permite una implementación muy eficiente de la integración numérica en las GPU, similar a los solucionadores de tela GPU para mallas de triángulos regulares [Tang et al. 2013]. El cálculo de fuerzas internas, sus jacobinos, y la solución al sistema lineal se paralelizan en la GPU, pero ejecutando la detección de colisión en la CPU. Con todo, el cuello de botella del solucionador es la multiplicación matriz-vector dispersa necesaria en

cada iteración de la PCR.

Por lo tanto, este producto se ha optimizado de múltiples maneras, explotando la regularidad de la tela a nivel de hilo y la especificación de cruce de hilos. Debido a la regularidad del patrón de entretejido, la fuerza interna de un nudo produce 13 nudos jacobinos w.r.t no cero (excluyendo las colisiones, cada nudo interactúa con 12 vecinos más él mismo). A continuación, la matriz A del sistema se divide como la suma de una matriz A_r regular y una matriz A_i de cola restante, donde A_r contiene los 13 bloques 5×5 regulares por nudo, y A_i contiene otros bloques resultantes de las colisiones. En cantidades para solo el 14% del coste del producto, incluso con un almacenamiento COO simple. Los coeficientes de A_r se almacenan en una matriz densa ordenada por una columna principal, con una fila y $325 = 13 \times 25$ columnas por nudo (2.53 KB por nudo en doble precisión). Los índices de A_r necesitan una matriz mucho más pequeña, con una fila y solo 13 columnas por nudo. Los productos relacionados con A_r se paralelizan en una base por nudo, y el almacenamiento de la columna principal de los coeficientes proporciona un acceso coalescente extremadamente eficiente a los datos. La paralelización imita la estrategia de una de las matrices ELL y HYB formadas en la biblioteca de la Cusp CUDA [Bell y Garland 2012], pero obtiene más de un 40% de aceleración sobre Cusp en los productos matriz-vector dispersos gracias a la paralelización a nivel de nudo.

En general, se logra una aceleración de 16x a 24x a través de una implementación de CPU multiproceso, en función principalmente del número de nudos (mayor aceleración para un mayor número de nudos) y el número de colisiones (menor aceleración para un mayor número de colisiones, ya que las colisiones se tratan en la CPU).

Para la representación fuera de línea de los resultados, la geometría del hilo se transforma en una representación volumétrica a nivel de la microfibras, y usa el trazador de ruta volumétrica Mitsuba [Jakob 2010]. Representa la dispersión anisotrópica de las microfibras usando un modelo de micro-láminas. Para cada hilo, se genera una polilínea con posiciones de nudo desplazadas para representar el rizado. Los hilos de polilínea se alisan usando estrías Catmull-Rom, y a continuación, se usa una versión modificada del método Lumislice [Chen et al. 2003; López-Moreno et al. 2014] para definir la representación volumétrica de la geometría del hilo que se pasa al reproductor Mitsuba. Cada hilo alisado se compone de miles de microfibras retorcidas, y los cortes que representan la distribución de densidad de la microfibras se establecen de forma perpendicular a lo largo del segmento del hilo a etapas regulares y giros incrementales. La densidad se calcula interseccionando la posición absoluta de cada texel en cada corte con un volumen de textura 3D. Esto se hace en un

shader de fragmento con llamadas almacenadas texel 3D asíncronas. La presente implementación se basa en los shaders de OpenGL y en la geometría instanciada, y se procesan hasta 8 M de cortes en menos de 100 ms en una máquina de escritorio convencional. Las tangentes de microfibras se almacenan también en una textura 3D, calculando los diferenciales de las posiciones texel en los cortes actuales y anteriores, que se diferencian principalmente por el giro a lo largo del eje del hilo. Debido a la naturaleza asíncrona de las llamadas texel en el shader, el corte anterior no es accesible, por lo tanto, los diferenciales locales se precálculan y se pasan a cada corte como una textura. Con todo, la densidad y la orientación de los hilos a nivel de microfibra se almacenan en texturas volumétricas (en los ejemplos 3 GB por trama).

A continuación, se describen ejemplos visuales y numéricos a gran escala para diversos escenarios de simulación de tela entretejida. Todos los ejemplos se han ejecutados en una CPU Intel Core i7-3770 de cuatro núcleos a 3,4 GHz con 32 GB de memoria, con una tarjeta gráfica NVIDIA Titan Black con 6 GB de memoria. La detección de colisiones se paraleliza en la CPU, mientras que la solución a la dinámica se paraleliza en la GPU como se ha tratado anteriormente. Todas las simulaciones se ejecutaron en una etapa de tiempo de 1 ms. Los valores de los parámetros usados en estos ejemplos se enumeran en la **figura 6**. Las temporizaciones representativas se resumen en la **figura 7**.

Los ejemplos son los siguientes:

- Camiseta sin mangas: Un maniquí masculino se vistió con una camiseta sin mangas hecha de 2.023 hilos y 350.530 nudos de cruce, una costura en cada lado y una costura en cada hombro (véase la **figura 8**). La densidad del hilo es de un hilo por milímetro (25 hilos por pulgada). El maniquí realiza movimientos de karate altamente dinámicos. La simulación muestra un movimiento a gran escala y pliegues resueltos a nivel de hilo, combinados con efectos a escala fina. La dinámica de la tela y la resolución de contacto son robustas incluso bajo tales movimientos desafiantes. A pesar del movimiento altamente dinámico del maniquí, la simulación es robusta.

- Camisa larga: Se diseñó una camisa con mangas para vestir a un maniquí de baile femenino (véase la **figura 9**). La camisa está hecha de 3.199 hilos y 559.241 nudos de cruce, con costuras en los lados del cuerpo, los hombros, las uniones de manga-cuerpo y a lo largo de las mangas. La densidad del hilo es de un hilo por milímetro (25 hilos por pulgada). En comparación con la camiseta sin mangas, esta simulación muestra una mayor complejidad debido a un mayor número de nudos de cruce y las dinámicas adicionales y la

mecánica de contacto de las mangas. El uso de un modelo a nivel de hilo produce de forma inherente dinámicas de tela de alta resolución, como se muestra por las arrugas a pequeña escala a través de las mangas.

- Enganches: Estos ejemplos muestran cómo las deformaciones extremas de la tela producen deformaciones plásticas altamente complejas a nivel de hilo, así como la influencia de las dinámicas de hilo locales en la forma global del tejido. Se produce un enganche en la camiseta sin mangas pinzando un nudo en la costura lateral y tirando de él hacia fuera muy rápido (véase la figura 10). La deformación debida a la tracción genera un pequeño agujero: el hilo de urdimbre del que se tira empuja lejos los hilos de trama, en un claro ejemplo de deslizamiento de hilos y dinámicas de contacto de hilos. Además, todo el enganche se transfiere a través de la camisa, mostrando arrugas finas como el efecto complejo de deslizamiento y de fricción de hilos. Tal efecto plástico puede lograrse solo simulando el tejido a nivel de hilo con una interacción hilo a hilo. Las deformaciones a escala fina que muestran un deslizamiento de hilos y las arrugas delgadas se combinan con el movimiento a gran escala de la camisa.

Se produce un segundo enganche en la zona del vientre de la camiseta sin mangas tirando de un nudo de cruce y fijando los cuatro nudos vecinos que no estén entre los hilos de los que se tiraron (véase las figuras 11A, 11B y 11C). Esta configuración intenta imitar la tracción de un hilo, mientras que se bloquea localmente el movimiento hacia el exterior del tejido con la mano. Las arrugas de la tela que forman una forma de cruz, muestran otro patrón de enganche familiar.

- Desgarro: Simular el desgarrar de la tela usando el modelo a nivel de hilo es sencillo, ya que el comportamiento complejo y de gran riqueza visual de los bordes deshilachados y los hilos sueltos vienen de forma natural con las dinámicas a nivel de hilo. La fractura se implementó simplemente dividiendo hilos cuando se excede un umbral de tensión de estiramiento, seguido de una etapa de relajación para permitir un correcto alivio de tensión y evitar una propagación de grietas irregulares. Podrían usarse los enfoques más sofisticados, tales como los tensores de separación [O'Brien y Hodgins 1999] y las subetapas de relajación locales [Pfaff et al. 2014]. Se activa un remuestreo de nudo frecuentemente durante la fractura y los comportamientos altamente plásticos debidos a las retiradas de hilos y el deslizamiento más allá del extremo de un hilo.

La camiseta sin mangas se desgarró pinzando dos conjuntos de nudos de cruce en la zona del torso y separándolos en direcciones opuestas, creando una ruta de fractura vertical y

una abertura en forma de diamante como se muestra en la **figura 12**. Los hilos individuales se desprenden de los bordes de la grieta, y o se cuelgan o se estiran los bordes a través de la abertura. Estos hilos sueltos y los bordes deshilachados resultantes se ven comúnmente en el desgarrar de muchos tipos de tejidos. Las deformaciones plásticas más sutiles pueden observarse alrededor de la grieta, debido principalmente al deslizamiento de hilos.

- Patrones de entretejido: El modelo a nivel de hilo permite una fácil configuración y simulación de diferentes patrones de entretejido. Como se ha mencionado anteriormente, configurar el tejido para un patrón de entretejido específico es solo una cuestión de configurar una indicación para cada nudo que especifica qué hilo está en la parte superior.

Los patrones de entretejido afectan directamente al comportamiento global y local de la tela, principalmente debido al diferente número de hilos flotantes. El tundido, por ejemplo, está muy influenciado por el número de cruces e hilos flotantes en el tejido. El aspecto visual de la tela también cambia según el patrón.

Tres sábanas de tela de 25 x 25 cm (véanse las figuras 1A, 1B y 1C) se simularon colgándolas de dos esquinas. La densidad de hilo es un hilo por milímetro (25 hilos por pulgada). Las tres sábanas son exactamente la misma excepto por el patrón de entretejido, donde la primera es de ligamento tafetán (figura 1A), la segunda es de sarga (figura 1B) y la tercera es de satén (figura 1C). Las figuras 1A, 1B y 1C muestran una instantánea de cada sábana después de dos segundos de simulación. Las sábanas muestran comportamientos claramente distintivos, de la figura 1A a la figura 1C las arrugas se mueven hacia la parte inferior, el borde inferior del tejido cae más abajo, y el borde superior muestra una curvatura más alta. Estos efectos se deben a una rigidez de tundido más baja para los entretejidos con más hilos flotantes, que es el resultado esperado en la realidad. La rigidez de tundido más baja resulta en una mejor calidad de drapeado. El aspecto visual es también diferente entre las tres instantáneas. En la parte superior de cada sábana, el efecto de "ver a través", debido al estiramiento revela las diferentes estructuras de entretejido de la tela. También puede observarse cómo la muestra de entretejido de sarga exhibe su característico patrón diagonal.

Las tres sábanas se someten a una prueba de marco de tundido y se mide el tundido en general a través del tiempo. Los resultados se trazan en la figura 2, que muestra las trazas de fuerza-ángulo para cada patrón de entretejido. Las trazas exhiben la histéresis debida a la fricción y a la no linealidad debida a la interferencia como se observa en los tejidos reales [Miguel et al. 2012], así como la influencia del patrón de entretejido. Una vez más, los patrones de entretejido con más hilos flotantes son menos resistentes al tundido, como se

esperaba.

Se simuló una cuarta sábana de tela que usa ligamento tafetán, pero esta vez con 4 hilos por milímetro (100 hilos por pulgada). Proporcionado el tamaño de la sábana, esta densidad de hilo se traduce en 1 millón de nudos de cruce. Este ejemplo, mostrado en las **figuras 5 13A y 13B**, muestra cómo el modelo puede manejar muy altas densidades de hilo que se encuentran en tejidos comunes, tal como el lino de cama. Arrugas pequeñas aparecen durante el movimiento (figura 13A) hasta que la sábana queda en reposo exhibiendo grandes arrugas de drapeado (figura 13B). De acuerdo con la nomenclatura textil, 100 hilos por pulgada son equivalentes a un recuento de hilos de 200.

Por lo tanto, la presente invención es un método eficiente para simular telas de entretejido a nivel de hilo. La novedad clave es una especificación de los cruces de hilos que resuelve el contacto hilo a hilo de forma implícita y representa un deslizamiento entre hilos de manera eficiente. Efectos tales como la fricción entre hilos, el tundido, y el contacto se capturan también con los modelos de fuerza simples. Este modelo a nivel de hilo permite la simulación de efectos tales como el desgarró con bordes deshilachados, la plasticidad debida a los enganches o el comportamiento no lineal debido a la fricción a escala fina.

Una de las ventajas de los modelos a nivel de hilo es la posibilidad de reproducir con alta fidelidad la mecánica no lineal de la tela real. Esto necesita de una estimación de los parámetros del modelo a partir de las mediciones de fuerza-deformación de la tela real. Los resultados de ajuste podrían compararse con los de los modelos de tela no lineales.

El modelo aproxima la compresión entre hilos de cruce como una función del estiramiento y de las fuerzas de flexión. Otra posibilidad sería incorporar la compresión como un grado extra de libertad, y añadir un potencial de compresión a la energía del sistema. Las fuerzas de estiramiento se modelan actualmente usando un potencial de estiramiento, pero otra posibilidad sería considerar que los hilos sean inextensibles, y representar la compresión producida durante el estiramiento debida al rizado.

A pesar de que los ejemplos se limitan a patrones de entretejido ortogonales, la especificación es general y podría aplicarse a las configuraciones arbitrarias con hilos entrelazados. Una simple extensión sería manejar el entretejido triaxial.

La implementación hace uso de las consultas de penetración de profundidad y de la respuesta de colisión en base a la penalización. Para asegurar la robustez del manejo de contacto, deben usarse las energías de penalización rígidas y debe limitarse la cantidad de

movimiento por etapa de tiempo. La robustez podría mejorarse usando la detección de colisión continua y la respuesta basada en restricciones, aunque el manejo de contacto podría entonces convertirse en el cuello de botella.

REIVINDICACIONES

1.- Método implementado por ordenador para simular el comportamiento de un tejido entretejido a nivel de hilo, comprendiendo el método:

- recuperar la información estructural de un tejido entretejido, incluyendo dicha información estructural al menos la distribución de los hilos (1) de urdimbre, los hilos (2) de trama y los nudos (3) de cruce de hilos del tejido entretejido;

- aplicar las condiciones límite en una pluralidad de etapas de tiempo;

caracterizado por que el método comprende además:

- describir cada nudo (3) de cruce de hilos del tejido entretejido por una coordenada (x) de posición 3D y dos coordenadas de deslizamiento, la coordenada (u) de deslizamiento de urdimbre y la coordenada (v) de deslizamiento de trama, que representan respectivamente el deslizamiento de los hilos de urdimbre (1) y de trama (2);

- medir las fuerzas en cada nudo (3) de cruce de hilos en base a un modelo de fuerza, midiéndose las fuerzas tanto en la coordenada (x) de posición 3D como en las coordenadas (u, v) de deslizamiento de los nudos (3) de cruce de hilo;

- calcular el movimiento de cada nudo (3) de cruce de hilos en una pluralidad de etapas de tiempo usando unas ecuaciones de movimiento derivadas que usan las ecuaciones de Lagrange-Euler, e integradas de forma numérica a través del tiempo, caracterizado por que las ecuaciones de movimiento representan la densidad de masa distribuida de manera uniforme a lo largo de los hilos, así como las fuerzas medidas y las condiciones límite.

2.- Método implementado por ordenador según la reivindicación 1, caracterizado por que la información estructural del tejido entretejido incluye además al menos alguna de las siguientes:

• un patrón 2D del tejido entretejido, que incluye localizaciones de paneles y de costura;

• la distribución de los hilos (1) de urdimbre, los hilos (2) de trama y los nudos (3) de cruce de hilos para cada panel;

• el patrón de entretejido del tejido entretejido para cada panel;

• las densidades y las anchuras de hilo para todos los diferentes tipos de hilo usados en el

tejido entretejido;

• los parámetros mecánicos para todos los diferentes tipos de hilos usados en el tejido entretejido, incluyendo dichos parámetros mecánicos al menos alguno de los siguientes:

- el módulo (Y) elástico,
- el módulo (B) de flexión,
- el módulo (S) de contacto de tundido,
- el coeficiente de fricción de deslizamiento,
- la relación de amortiguamiento a masa,
- la relación de amortiguamiento a elasticidad.

5

10

3.- Método implementado por ordenador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la información estructural recuperada del tejido entretejido incluye el coeficiente (μ) de fricción de deslizamiento de los hilos, y caracterizado por que el modelo de fuerza incluye las fuerzas de fricción de deslizamiento usando el coeficiente (μ) de fricción de deslizamiento y las coordenadas (u, v) de deslizamiento.

15

4.- Método implementado por ordenador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la información estructural recuperada del tejido entretejido incluye la rigidez (k_c) de los hilos, y caracterizado por que el modelo de fuerza incluye el contacto entre los hilos paralelos adyacentes usando las coordenadas (u, v) de deslizamiento, la rigidez (k_c) de los hilos y la distancia (L) entre hilos obtenida a partir de la distribución de los hilos.

20

5.- Método implementado por ordenador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la información estructural recuperada del tejido entretejido incluye el módulo (Y) elástico de los hilos, y caracterizado por que el modelo de fuerza incluye las fuerzas de estiramiento.

25

6.- Método implementado por ordenador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la información estructural recuperada del tejido entretejido incluye el módulo (B) de flexión de los hilos, y caracterizado por que el modelo de fuerza incluye las fuerzas de flexión.

7.- Método implementado por ordenador según las reivindicaciones 5 y 6, caracterizado por

que el modelo de fuerza usa una compresión normal entre hilos en los cruces de hilos usando los componentes normales de las fuerzas de estiramiento y de flexión.

8.- Método implementado por ordenador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la información estructural recuperada del tejido entretejido incluye el módulo (S) de contacto de tundido de los hilos, y caracterizado por que el modelo de fuerza incluye las fuerzas de tundido.

9.- Sistema para simular el comportamiento de un tejido entretejido a nivel de hilo, comprendiendo el sistema:

- medios de almacenamiento de datos para almacenar la información estructural de un tejido entretejido, incluyendo dicha información estructural al menos la distribución de los hilos (1) de urdimbre, los hilos (2) de trama y los nudos (3) de cruce de hilos del tejido entretejido; y

- medios de procesamiento de datos configurados para recuperar dicha información estructural y para aplicar las condiciones límite en una pluralidad de etapas de tiempo;

caracterizado por que los medios de procesamiento de datos se configuran además para:

describir cada nudo (3) de cruce de hilos del tejido entretejido por una coordenada (x) de posición 3D y dos coordenadas de deslizamiento, la coordenada (u) de deslizamiento de urdimbre y la coordenada (v) de deslizamiento de trama, que representan respectivamente el deslizamiento de los hilos de urdimbre (1) y de trama (2);

medir las fuerzas en cada nudo (3) de cruce de hilos en base a un modelo de fuerza, midiéndose las fuerzas tanto en la coordenada (x) de posición 3D como en las coordenadas (u, v) de deslizamiento de los nudos (3) de cruce de hilo;

calcular el movimiento de cada nudo (3) de cruce de hilos en una pluralidad de etapas de tiempo usando unas ecuaciones de movimiento derivadas que usan las ecuaciones de Lagrange-Euler, e integradas de forma numérica a través del tiempo, caracterizado por que las ecuaciones de movimiento representan la densidad (ρ) de masa distribuida de manera uniforme a lo largo de los hilos, así como las fuerzas medidas y las condiciones límite.

10.- Producto de programa de ordenador para simular el comportamiento de un tejido entretejido a nivel de hilo, caracterizado por que comprende un código de programa que puede usarse en un ordenador para realizar las etapas del método implementado por ordenador definido en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

11.- Producto de programa de ordenador según la reivindicación 10, caracterizado por que se almacena en un medio de soporte del programa.