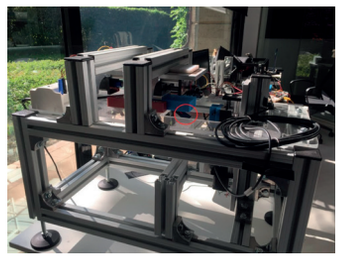
Caracterización del comportamiento mecánico de tejidos para su simulación mediante gráficos por computador



Characterization of the mechanical behavior of textiles for its simulation through computer graphics

Eder Miguel-Villalba[1,2], José SanMartín-López[1] y Sofía Domínguez[2]

[1] Universidad Rey Juan Carlos. Dpto. de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos, Estadística e Investigación Operativa. Calle tulipán s/n. – 28933 Móstoles (Madrid).
[2] Desilico. Calle Téllez, 24. Of. 1 – 28007 Madrid (España).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9331 | Recibido: 15/07/2019 • Inicio Evaluación: 16/07/2019 • Aceptado: 22/11/2019

ABSTRACT

- Nowadays, the fashion industry is introducing simulation technologies into its workflow. However, the realism of the simulations is limited by the simulation models and their parameters. To maximize this realism it is necessary to determine the parameters of the simulation models according to the actual behavior of the different textiles.
  In this work we present a testing device to capture the flexural behavior of textile fabrics. The global estimation system that makes use of these data to determine the simulation parameters that minimize the differences between the real and the simulated behavior is also described.
- **Key Words:** Testing device; Characterization of Textile Fabrics; Simulation and Numerical Optimization.

RESUMEN

Actualmente la industria de la moda está introduciendo tecnologías de simulación en su flujo de trabajo. Sin embargo, el realismo de las simulaciones está limitado por los modelos de simulación y sus parámetros. Para maximizar dicho realismo es necesario determinar los parámetros de los modelos de simulación utilizados de acuerdo al comportamiento real de los distintos tejidos.

En este artículo se presenta un dispositivo de ensayo para capturar el comportamiento a flexión de tejidos textiles. Se describe también el sistema de estimación global que hace uso de dichos datos para determinar los parámetros de simulación que minimizan las diferencias entre el comportamiento real y el simulado.

Palabras Clave: Dispositivo de ensayo; Caracterización de Tejidos Textiles; Simulación y Optimización Numérica.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de simulación han supuesto importantes avances en diferentes industrias, por ejemplo para permitir el diseño y evaluación de sistemas complejos [1], sistemas de comunicación [2], fábricas, industria 4.0, *smart factories* [3] o incluso en la ayuda a la toma de decisiones [4]. Mientras que industrias como la audiovisual presenta unos requisitos de realismo relativamente bajos (un comportamiento plausible es suficiente para engañar al ojo humano en una película), las exigencias impuestas por ejemplo a la industria de la moda por parte de los usuarios son muy altas: una aplicación de probador virtual está destinada al fracaso si las simulaciones presentadas a los clientes no son fieles a la realidad.

En la industria textil los cambios se producen muy lentamente. Recientemente ha comenzado a adoptar soluciones de simulación para acelerar el flujo de trabajo en diseño y mostrar previsualizaciones a clientes [5, 6]. Sin embargo, la asignación de parámetros a los modelos de simulación aún se realiza habitualmente de forma manual: un diseñador manipula un tejido, observa su comportamiento en distintas condiciones para, posteriormente, ajustar los parámetros del modelo mediante prueba y error hasta que la simulación sea suficientemente similar al comportamiento real. Este flujo de trabajo es ineficiente, costoso y susceptible a errores humanos. La consecuencia inmediata es una falta de confianza en los resultados de las simulaciones y la reticencia a la utilización de la simulación.

Por tanto, la definición de los parámetros del modelo de simulación son fundamentales en esta industria. Este artículo presenta un proceso en el que se define un dispositivo de ensayo diseñado para capturar el comportamiento de tejidos reales, a fin de procesarlos a través de un sistema de estimación de parámetros y obtener los parámetros necesarios para producir simulaciones realistas.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo se propone definir un proceso de simulación realista para diferentes tejidos, para ello, cumplirá los siguientes objetivos:

- Crear un sistema automático para realizar ensayos de tracción y flexión sobre un tejido.
- Desarrollar un sistema de estimación de parámetros que permita determinar las propiedades elásticas de los tejidos en base a los datos experimentales producidos por el sistema de ensayo.
- Simular de forma realista el comportamiento elástico de un tejido a partir de los parámetros estimados.

3. ESTADO DEL ARTE Y NECESIDAD

Tradicionalmente se ha utilizado la simulación en diferentes campos de la ingeniería: existen aplicaciones de organización industrial, gestión de stocks y JIT-Just In Time [7], simulación médica [8] o bien aplicaciones industriales tan dispares como

la caracterización del comportamiento de un sensor [9], o la aplicación de técnicas de soldadura rápida [10] entre otros. El generalizado uso de estas técnicas, utilizado como realimentación en las distintas fases del diseño, ha convertido la simulación en un elemento indispensable en cualquier proceso productivo.

En simulación textil orientada a moda, las prendas se representan como una superficie bidimensional en un espacio tridimensional [11] debido a su pequeño espesor. Por ello se hace innecesario añadir grados de libertad para representar el espesor del tejido explícitamente. Gracias a esta representación reducida es posible separar el comportamiento de los tejidos en dos componentes: comportamiento de membrana y comportamiento de flexión [12]. El comportamiento de membrana define la respuesta del material a esfuerzos aplicados en el plano del material, como tracción y cizallado en el plano. Por su parte, el comportamiento a flexión define la respuesta del material ante deformaciones de flexión y es fundamental para caracterizar la caída de prendas de ropa.

El comportamiento global de una prenda en un probador virtual, donde el objetivo es visualizar la caída de una prenda sobre un cuerpo estático, viene dominado por su comportamiento elástico, tanto en membrana como en flexión. Además, dicho comportamiento elástico se caracteriza por ser dependiente de la orientación (anisotrópico) y extremadamente no lineal. Por ello, normalmente los sistemas de ensayo de elasticidad para tejidos separan los ensayos en ensayos de tracción y ensayos a flexión. En este artículo se presenta un nuevo dispositivo de ensayo a flexión, aunque también se ha utilizado otro dispositivo para obtener datos de la resistencia a tracción de los tejidos utilizados en la sección de Resultados.

En la literatura, existen dos referencias habituales a sistemas de ensayo para textiles para captura de comportamientos elásticos: Kawabata Evaluation System (KES) [13] y Fast Assurance for Simple Testing (FAST) [14]. Ambos tienen por objetivo capturar el comportamiento de tejidos y estimar los parámetros correspondientes para un modelo de simulación simple. Tanto el KES como el FAST se dividen en 4 dispositivos. Para el KES los dispositivos miden: (1) tracción y cizallado, (2) flexión, (3) compresión y (4) espesor; por su parte, para el FAST los dispositivos capturan: (1) compresión, (2) flexión, (3) extensión y (4) estabilidad dimensional. El ensayo de flexión del KES se basa en medir la fuerza necesaria para flexionar el tejido 150 grados. FAST plantea un sistema en el que se mide la longitud de tejido en caída libre necesaria para conseguir que el extremo libre toque la línea a 41.5 grados respecto al plano de soporte horizontal, tal y como se muestra en la figura 1. La diferencia fundamental de estos dos dispositivos respecto al dispositivo presentado en este artículo reside que mientras que el dispositivo FAST produce un valor para caracterizar la resistencia a flexión del tejido, nuestro sistema genera toda una secuencia de puntos (a especificar en la configuración del ensayo). Esto permite modelar los efectos no-lineales característicos de los tejidos.

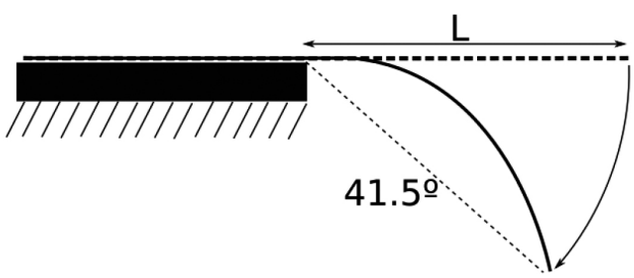


Figura 1: Ensayo de flexión en voladizo utilizado en el sistema FAST

Existen también dispositivos independientes (no pertenecientes a un sistema completo) diseñados para capturar un tipo específico de deformación [15]. Los métodos de lazo son utilizados en tejidos muy ligeros. Se basan en posicionar un parche de tejido en una determinada forma de lazo y medir la altura y anchura de dicho lazo. Además, existen otros métodos para obtener métricas promedio sobre el comportamiento general de los tejidos, como pueden ser el ensayo de flexión circular definido en la norma ASTM D4032 o los dispositivos de ensayo de caída o vuelo [16, 17].

A nivel académico se han propuesto otros dispositivos, aunque debido a su complejidad no han tenido aplicación industrial. El dispositivo de ensayo de flexión propuesto en [18] utiliza el principio de voladizo de forma muy similar al descrito en FAST, pero en lugar de capturar un único punto, captura imágenes de la caída del tejido y realiza un postprocesado manual generando una polilínea a lo largo del perfil del tejido para diferentes longitudes de caída. En [19] se utiliza de nuevo el principio de voladizo pero combinado con un complejo sistema de reconstrucción 3D para obtener la geometría de la muestra de tejido para diferentes longitudes de caída. Finalmente, se han propuesto también sistemas basados en adquisición de video, como [20, 21]. Estos últimos sistemas son muy flexibles y ofrecen una gran cantidad de datos, pero ofrecen poca controlabilidad. Las deformaciones a las que se somete el tejido son generadas por actuadores pseudo-aleatorios imposibles de reproducir en una simulación. Más recientemente, destaca el dispositivo desarrollado por Browzwear (Fabric Analyzer) [22], que permite al usuario capturar el comportamiento de los tejidos a tracción y a flexión.

4. METODOLOGÍA EMPLEADA

Desilico es una empresa de reciente creación cuya misión es proveer servicios de simulación realista de tejidos para la industria de la moda con el objetivo de reducir los tiempos necesarios para el diseño de prendas así como facilitar la comunicación y colaboración entre las distintas partes que participan en dicho proceso. Realizan tanto simulación mecánica como simulación óptica, que se definirá más adelante. La primera consiste en simular el comportamiento mecánico de las prendas de forma que el resultado sea predictivo respecto al resultado real, por ejemplo verificar la caída de una prenda sobre un maniquí. La segunda consiste en la reproducción realista de los efectos en interacciones de la luz con el tejido. Este artículo se centra en la primera.

Como se ha indicado, en simulación de tejidos, se estudia el comportamiento en dos componentes: membrana y flexión. En ambos casos, el comportamiento es no-lineal y dependiente de la orientación (anisotrópico). Desilico utiliza un modelo de simulación basado en hilos y contactos persistentes [23], donde cada hilo se discretiza en segmentos y cruces (entre hilos) y el comportamiento está determinado por los parámetros mecánicos como la resistencia a tracción, flexión y cizallado.

Para obtener una simulación predictiva, los parámetros del modelo de simulación deben ser calculados de forma que el resultado final refleje las características del escenario real correspondiente. Para ello, es necesario un sistema de estimación de parámetros basado en datos reales que estime los parámetros del modelo de simulación que minimizan la diferencia entre el comportamiento real y el simulado. La pieza fundamental de este sistema de estimación son los datos reales. Estos provienen de medidas realizadas sobre muestras de tejido a través de dispositivos de ensayo, como el presentado en este trabajo. Los datos provenientes de los ensayos de tracción consisten en pares (fuerza,

elongación) y se utilizan para estimar la resistencia a tracción y la resistencia a cizallado. Por su lado, los datos provenientes del ensayo a flexión se utilizan para estimar la resistencia a flexión.

Una vez obtenidos los datos reales tal como se ha descrito en el párrafo anterior, el sistema de estimación entra en juego. Este sistema se basa en algoritmos de optimización numérica aplicados a la minimización de la diferencia entre los datos simulados y los datos capturados en los ensayos. La figura 2 ilustra el proceso de estimación de parámetros. Los bloques principales en este diagrama son la función de error y el algoritmo de optimización, sobre los cuales itera el sistema de estimación hasta converger a un conjunto de parámetros óptimo.

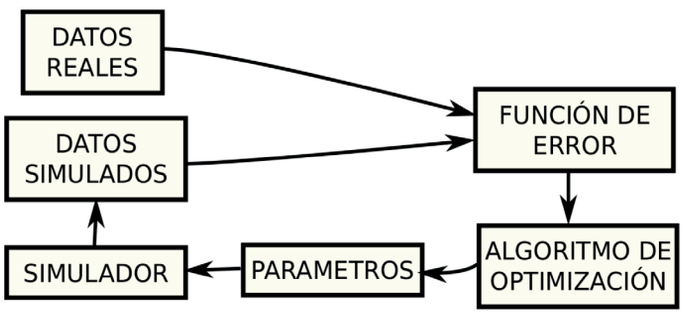


Figura 2: Proceso de estimación de parámetros. Se observa que los datos reales son constantes mientras que los datos simulados se regeneran con cada conjunto de parámetros intermedio

La función de error tiene como objetivo evaluar la diferencia entre el comportamiento real y el simulado, para que el algoritmo de optimización pueda calcular un nuevo conjunto de parámetros que reduzca dicha diferencia. En este trabajo, los datos reales y simulados consisten en el ángulo formado por el extremo del tejido en voladizo y el borde del soporte horizontal desde el que cae, en los ensayos reales y en los ensayos simulados, respectivamente.

La forma específica de realizar este cálculo depende de las características del problema, el coste computacional de la evaluación de la función de error y de la información disponible. En el sistema presentado, cada evaluación de la función de error requiere realizar una simulación replicando el ensayo real, por lo que tiene un coste computacional elevado. Además, dada la complejidad del simulador, es extremadamente difícil extraer explícitamente información sobre el gradiente de la función de error. Por último, los parámetros están sujetos a un rango de valores válido, por lo que el algoritmo de optimización debe soportar restricciones de valor mínimo y máximo sobre las variables a optimizar (los parámetros). Bajo estas condiciones, los algoritmos de optimización de tipo caja-negra resulta la mejor opción. En concreto, se ha utilizado el algoritmo COBYLA [24] implementado en la librería de optimización NLOpt [25].

Uno de los problemas más característicos de los algoritmos de optimización es el de los mínimos locales. Esto ocurre habitualmente porque el algoritmo de optimización converge a un conjunto de parámetros a partir del cual no es capaz de encontrar otro conjunto de parámetros cercano que reduzca el valor de la función de error. Esto hace que el resultado final de la estimación dependa en gran medida del juego de parámetros utilizado como inicialización del algoritmo. Para minimizar esta dependencia, el sistema de estimación presentado aquí opera de forma progresiva.

La estimación progresiva consiste en dividir el proceso de estimación en diferentes etapas cada una de las cuales tiene una complejidad mucho menor que el problema completo y mejora los resultados obtenidos en etapas anteriores. Este esquema de estimación progresiva reduce el impacto de la elección del conjunto de parámetros inicial, ya que cada etapa introduce pocos nuevos parámetros a estimar y utiliza resultados previos.

En el sistema propuesto, en primer lugar se estima la resistencia a tracción, para las dos direcciones principales (0 y 90 grados), en base a los datos de los ensayos de tracción. Posteriormente, se estima el módulo de flexión de forma análoga, utilizando los valores de resistencia a tracción ya estimados. Finalmente, se estima el módulo de cizallado utilizando los datos de tracción a 45 grados y los parámetros ya estimados en etapas anteriores.

5. DISEÑO DE MÁQUINAS DE ENSAYO

La simulación de tejidos en ocasiones obedece a obtener un resultado atractivo estéticamente, o bien simular un comportamiento del tejido que no tiene por qué ser realista, siendo suficiente un resultado plausible. En ambos casos se carece de datos reales de las propiedades mecánicas de los tejidos para realizar la simulación, de manera que el resultado obtenido será no realista.

Como solución inicial para obtener datos reales, se diseñaron unos primeros prototipos sencillos que permitían realizar dos tipos de ensayos mediante accionamiento manual. Por un lado se trataba de un ensayo de tracción simple, de manera que se sujetaba el tejido desde un extremo, mientras que se acoplaban un conjunto de pesas en el otro extremo. De esta manera se podía realizar una primera observación de la elongación, deformación, estrechamiento, etc de los tejidos. Por otro lado se realizó otro prototipo sencillo de ensayo a flexión, situando la tela en voladizo, y variando sucesivamente la longitud en voladizo, lo que permitía examinar el comportamiento en caída del material.

Estos primeros prototipos no permitían una caracterización precisa de las propiedades del tejido, al carecer de sensores de medida, ofreciendo únicamente una idea intuitiva del comportamiento del material. Por otra parte el sistema de toma de datos era manual y el proceso en sí consumía gran cantidad de tiempo en cada prueba, siendo poco práctico. Es por ello que se hizo necesaria la creación de un sistema automatizado para cada uno de los dos ensayos.

En el primer caso se trata de la automatización de un ensayo de tracción. La probeta de tejido se sitúa sujeta de los extremos, uno fijo y otro móvil, de manera que sucesivamente el extremo móvil va realizando desplazamientos, quedando registrada mediante una célula de carga la tensión en cada uno de los pasos. Es un ensayo sencillo pero necesario en la caracterización básica del tejido.

En el ensayo a flexión (Fig. 3 y 4), se busca dejar en voladizo gradualmente la tela. El ensayo se realiza haciendo avanzar mediante un motor paso a paso una tela hacia el centro de la máquina donde hay practicado un hueco por el que la tela va a ir cayendo y quedando en voladizo.

De esta manera se hace avanzar la tela en sucesivos pasos. En cada paso se toman datos de la curvatura del tejido. Para ello se realiza un barrido a lo largo de toda la superficie del tejido en voladizo, tomando mediciones con un distanciómetro láser, y se obtienen puntos de esta curvatura. Por diferentes métodos de interpolación, obtenemos la curvatura del tejido en cada paso. Posteriormente, cada una de estas aproximaciones son procesadas automáticamente, eliminando así las distancias inválidas correspondientes al inicio y fin de carrera del motor lineal que mueve verticalmente el distanciómetro ya que en ambos casos no se están tomando medidas sobre el tejido.

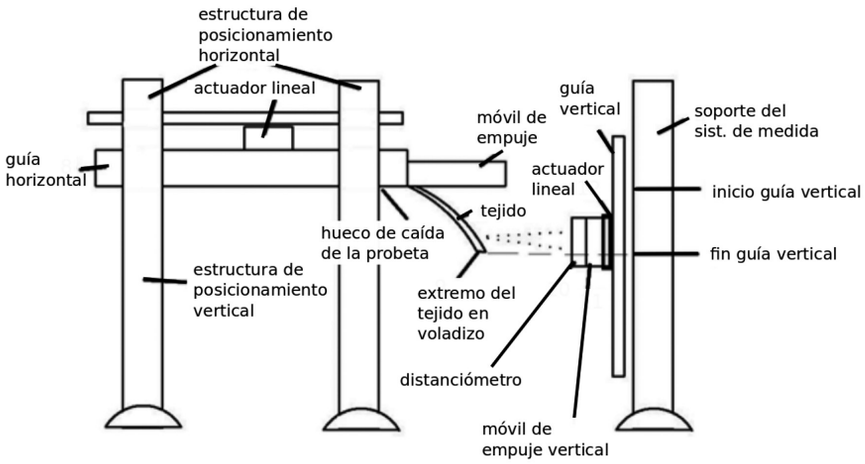


Figura 3: Imagen esquemática de la máquina de ensayo diseñada

5.1. COMPONENTES DE LA MÁQUINA DE ENSAYO A FLEXIÓN

La máquina de ensayo a flexión para tejidos está construida a 3 niveles (inferior, principal y superior) sobre una armazón de perfiles de aluminio anodizado, de 45x45L de la marca NIKAI, como se aprecia en la figura 4. Sobre esta estructura, en el nivel principal, descansa la base principal sobre la que se sitúa la mayor parte de los componentes de la máquina. Por un lado el sistema de control, que se realiza mediante un Arduino Uno RVE3, y una fuente de alimentación. Sobre la base se encuentra el Sistema de arrastre del tejido a estudiar. Como se ha indicado, esta tela es arrastrada en pequeños ciclos a una abertura practicada en la base, donde se produce la caída libre de la tela.

El Sistema de Arrastre está movido mediante un actuador lineal sujeto a una superestructura de perfilería de aluminio (Fig. 4), conformando el nivel superior de la estructura. El sistema está constituido por un tornillo sin fin que mueve una guía de 300 mm de carrera, accionado por un Motor paso a paso Nema 23 con precisión de 1,8º. El actuador precisa de un controlador de motor del tipo TB6600, con una potencia máxima de 160W.

Por último tenemos el sistema de medición de la curvatura de la tela. El sistema se compone de un actuador lineal similar al ya descrito en el sistema de arrastre, situado en posición vertical a la base principal de la máquina y perpendicular a ésta. El actuador va a mover un distanciómetro láser que recorrerá el espacio entre el nivel inferior hasta la base principal, tomando datos del perfil de la tela en caída libre, obteniendo valores de su curvatura y permitiendo por tanto definir la forma de esta tela. Para ello el distanciómetro inicia el movimiento en el extremo vertical de sus recorrido y va descendiendo a pasos determinados, de acuerdo a la precisión requerida. En cada paso, de detiene, toma medida de la distancia y se mueve al siguiente paso. De esta manera, el conjunto de valores obtenido determina la curvatura del tejido. El distanciómetro láser es un sensor de la serie FT25 con alcance entre 20-200 mm de la empresa Sensopart, con precisión de 0,12 mm.

6. RESULTADOS

Se han capturado datos para dos tejidos distintos: un tejido satinado (a) utilizado para simular vestido y un tejido de lino (b) utilizado para simular una camisa y un pantalón. Las capturas de los tejidos se han llevado a cabo para 2 direcciones, 0 y 90 grados, o en dirección de trama y urdimbre, de forma que se pueda caracterizar el comportamiento de ambos tipos de hilo. También se han realizado los ensayos de tracción, pero no se muestran resultados ya que son independientes del dispositivo de ensayo presentado en este trabajo. Los datos capturados se han utilizado para estimar la resistencia a tracción, flexión y cizallado para posteriormente generar simulaciones utilizando el simulador propio de DESILICO.

6.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

La captura de datos en el dispositivo de ensayo genera curvas correspondientes al perfil de caída (Fig. 5) para distintas longitudes de caída. Debido a la disposición física de los distintos componentes, es necesario postprocesar estos datos. En concreto, en su posición inicial, el distanciómetro mide la distancia al móvil de empuje. Durante el barrido vertical, el sensor mide la distancia al tejido generando el perfil de caída. Finalmente, el haz láser baja por debajo del extremo libre de la

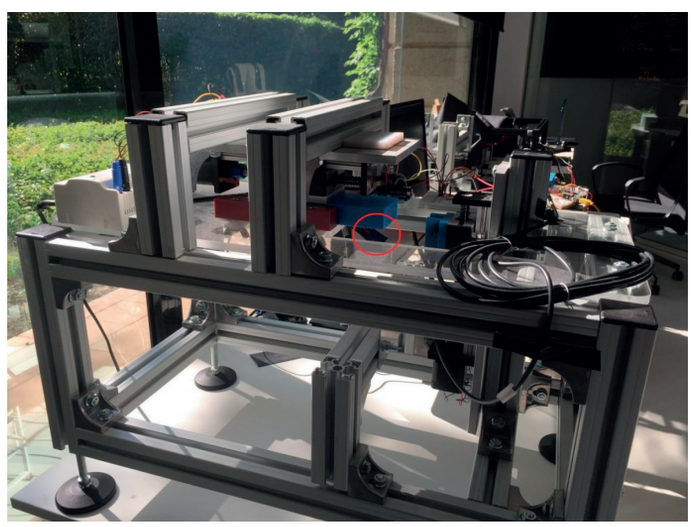


Figura 4: Máquina de ensayo a flexión. Se aprecia el nivel superior, donde está situado el actuador lineal; el nivel principal, por el que discurre la tela por la abertura en la base, al nivel inferior (en círculo rojo detalle de la tela)

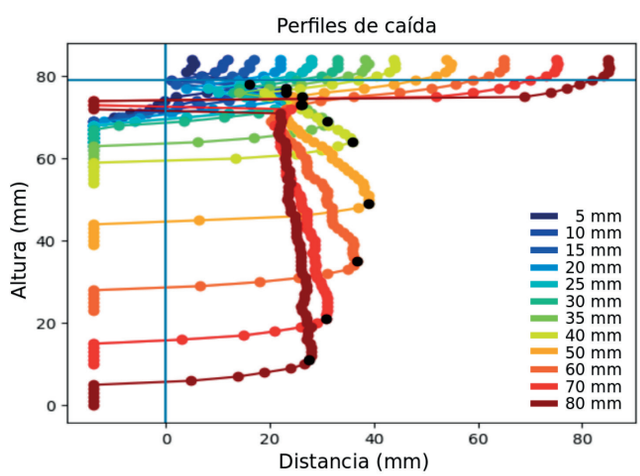


Figura 5: Visualización de perfil de distancias para diferentes longitudes de caída. Los puntos negros corresponden al punto final detectado en postprocesamiento. Hay mayor densidad de ellos para longitudes de caída pequeñas debido al muestreado no uniforme (incrementos de 5 mm frente a incrementos de 10 mm) que permite obtener más información en zonas donde el error de medida es mayor

muestra, produciendo valores fuera de rango. El postproceso se basa en una heurística que tiene en cuenta la disposición espacial de los mecanismos y elimina los datos irrelevantes y detecta la última medida válida correspondiente a la distancia del extremo libre de la muestra.

La realización de los ensayos de flexión sobre los tejidos utilizados para la generación de los resultados mostrados a continuación ha llevado una media de 12 minutos por tejido, incluyendo el tiempo de post-procesamiento, que es del orden de 5-10 segundos por cada ensayo. Teniendo en cuenta los ensayos de tracción, el tiempo de captura para un tejido completo se sitúa entre 20-24 minutos. En comparación, la realización de los ensayos de flexión con los prototipos manuales mencionados anteriormente requiere alrededor de 60 minutos por tejido, incrementándose a casi 90 minutos si se incluyen los ensayos de tracción.

6.2. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN

A fin de poder generar simulaciones realistas de prendas basadas en estos materiales, se ha llevado la estimación de parámetros tal y como se ha explicado en la sección 4. Los resultados de la estimación se muestran en la figura 6.

6.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Las figuras 7 y 8 muestran los resultados obtenidos al simular las prendas diseñadas con los materiales descritos previamente. Dichos materiales se han obtenido de una tienda de venta al por menor, por lo que no se dispone de las fichas técnicas correspondientes. Para la simulación se ha utilizado el simulador propietario de DESILICO y los parámetros de tejidos obtenidos del sistema de estimación. Además del modelo de simulación de hilos, el simulador incorpora otras características como detección y tratamiento de colisiones, así como modelos de contacto, que permiten generar resultados de alta calidad. Los parámetros de contacto se han determinado a través de prueba y error sobre un escenario más simplificado (parche de tejido en reposo sobre una esfera) a fin de obtener un buen comportamiento plausible sin afectar al rendimiento. El resultado del simulador es procesado posteriormente por el motor de renderizado, que es el responsable último de la calidad visual. Cabe destacar que el proceso de renderizado trabaja también a nivel de hilo.

Para la simulación del vestido generado con el material satinado se observa que la amplitud y frecuencia de las arrugas en la simulación es muy similar a las obtenidas en el vestido real. Resulta imposible realizar un análisis cuantitativo de los resultados por varios motivos: existen diferencias insalvables en la reproducción exacta de los elementos de la simulación, como las costuras, que en la actualidad no se modelan explícitamente; las interacciones de contacto entre el vestido y el maniquí producen ramificaciones y divergencias en la simulación, cada una de las cuales da lugar a una configuración de reposo distinta. Esto explica las diferencias en las arrugas creadas en la parte superior del vestido, que es la parte donde el contacto es más relevante.

Para las otras dos simulaciones, en el caso de la escena del avatar en una posición extrema, generando tensión en la camiseta y pantalón de lino (Fig. 8), muestra arrugas naturales, correspondientes a la situación de tensión.

7. CONCLUSIONES

El trabajo presenta un sistema que permite obtener simulaciones realistas de diferentes tejidos, para visualizar cuál será el aspecto definitivo de la ropa de acuerdo al tejido utilizado en su elaboración. Así, de una manera sencilla, es posible probar en el proceso de diseño, varias prendas de ropa en diferentes tejidos, pudiendo encontrar la combinación óptima de acuerdo al aspecto buscado.

Se ha descrito el sistema en sus diferentes fases. Por un lado se han analizado las máquinas creadas para la adquisición de los datos de los diferentes ensayos de comportamiento mecánico de los tejidos. A continuación se ha contrastado la bondad de los datos obtenidos, comparándolos con los obtenidos con diferentes estimaciones, eliminando datos anómalos o posibles errores de medición. Se han presentado dos casos reales a modo de ejemplo.

Finalmente, de acuerdo al comportamiento del tejido definido a partir de los datos reales obtenidos y su posterior procesamiento, se han mostrado varios ejemplos de caída y ajuste de diferentes prendas de ropa, de acuerdo al diseño elegido.

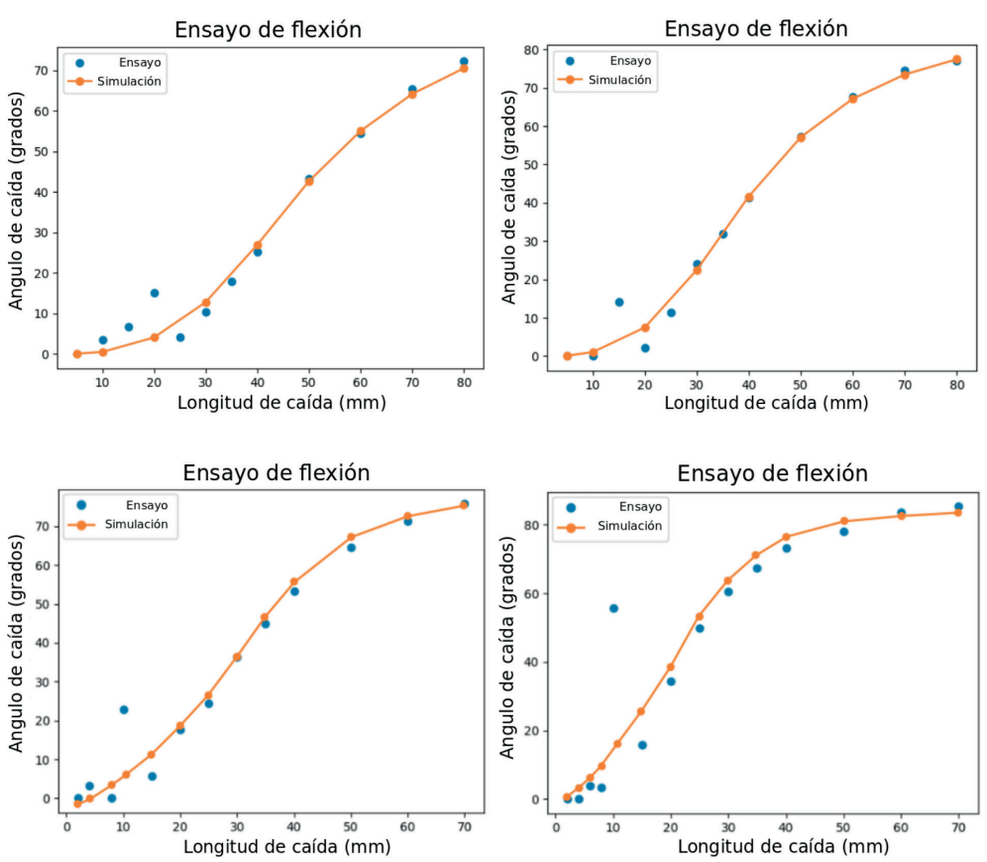


Figura 6: Visualización del ángulo formado por el extremo en voladizo y el último punto del soporte horizontal sobre el que desliza la probeta a partir de los datos capturados y postprocesados como se ha indicado anteriormente. De izquierda a derecha: resultados para trama y urdimbre, respectivamente. De arriba a abajo, resultados para el tejido de lino y el tejido satinado



Figura 7: A la izquierda, el vestido real. A la derecha el vestido simulado



Figura 8: A la izquierda, una modelo con el pantalón y la camiseta de lino. A la derecha, la simulación de la misma prenda

8. TRABAJOS FUTUROS

La anchura de las probetas se ha determinado para ser suficientemente grande para evitar el efecto de pequeñas ondulaciones en la zona central sobre la que se toma el perfil de distancia, pero como trabajo futuro se podría eliminar este problema o minimizar su impacto utilizando un sensor láser de línea en lugar de punto. De esta forma para medir la distancia se utilizarían las distancias medidas a lo largo de la anchura de la muestra de tejido (mediante la línea trazada por el láser para cada posición del barrido vertical).

El sistema presentado captura datos relativos al comportamiento del tejido para sus distintos modos de deformación de forma aislada. Esto permite evitar ciertos problemas en la estimación de parámetros, como los mínimos locales, pero impide la caracterización de posibles interacciones entre distintos modos de deformación. A fin de capturar también este tipo de interacciones, sería interesante diseñar un sistema de ensayo capaz de producir datos que combinen los distintos modos de deformación de forma controlada.

REFERENCIAS

[1] S. Kchir, S. Dhouib, J. Tatibouet, B. Gradoussoff and M. Da Silva Simoes, "RobotML for industrial robots: Design and simulation of manipulation scenarios," 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin, 2016, pp. 1-8. https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733727

[2] M. Garau, G. Celli, E. Ghiani, F. Pilo and S. Corti, "Evaluation of Smart Grid Communication Technologies with a Co-Simulation Platform," in IEEE Wireless Communications, vol. 24, no. 2, pp. 42-49, April 2017. https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600214

[3] Weyer, Stephan & Meyer, Torben & Ohmer, Moritz & Gorecky, Dominic & Zühlke, Detlef. (2016). Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. IFAC-PapersOnLine. 49. 97-102. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.168

[4] B. Biller, S. R. Biller, O. Dulgeroglu and C. G. Corlu, "The role of learning on industrial simulation design and analysis," 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, 2017, pp. 3287-3298. http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2017.8248046

[5] EFI Optitex. Webpage: www.optitex.com.

[6] Browzwear. Webpage: www.browzwear.com.

[7] R. Towill, Denis. (1996). Industrial dynamics modeling of supply chains. Logistics Information Management. 9. 43-56. https://doi.org/10.1108/09600039610113182

[8] Sarthak Misra, K.T. Ramesh & Allison M. Okamura (2010). Modelling of non-linear elastic tissues for surgical simulation, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 13:6. https://doi.org/10.1080/10255840903505121

[9] Tibrewala, A & Phataralaoha, A & Büttgenbach, S. (2008). Simulation, fabrication and characterization of a 3D piezoresistive force sensor. Sensors and Actuators A: Physical. 147. 430-435. https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.05.020

[10] Perret, W., R. Thater, U. Alber, C. Schwenk, M. Rethmeier. Approach to assess a fast welding simulation in an industrial environment – Application for an automotive welded part. International Journal of Automotive Technology. December 2011, Volume 12, Issue 6, pp 895–901. https://doi.org/10.1007/s12239-011-0102-0

[11] D. Baraff and A. Witkin. "Large steps in cloth simulation". In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1998 Jul 24 (pp. 43-54). ACM SIGGRAPH. https://doi.org/10.1145/280814.280821

[12] E. Grinspun, A. N. Hirani, M. Desbrun and P. Schröder. "Discrete shells". Proceedings of ACM SIGGRAPH , Eurographics Symposium on Computer animation, 2003. http://dx.doi.org/10.2312/SCA03/062-067

[13] S. Kawabata. "The standardization and analysis of hand evaluation". In Effect of mechanical and physical properties on fabric hand. Jan 1, 2005. Woodhead Publishing.

[14] P. G. Minazio. "FAST–fabric assurance by simple testing". International Journal of Clothing Science and Technology. 1995 May 1;7(2/3):43-8. https://doi.org/10.1108/09556229510087146

[15] J. Hu. "Fabric testing". Elsevier; 2008 Sep 9.

[16] G. E. Cusick. "The measurement of fabric drape". Journal of the Textile Institute. 1968 Jun 1;59(6):253-60. https://doi.org/10.1080/00405006808659985

[17] C. C. Chu, C. L. Cummings CL and N.A. Teixeira. "Mechanics of elastic performance of textile materials: Part V: A study of the factors affecting the drape of fabrics—the development of a drape meter". Textile Research Journal. 1950 Aug;20(8):539-48. https://doi.org/10.1177%2F004051755002000802

[18] H. Wang, J. F. O'Brien and R. Ramamoorthi. "Data-driven elastic models for cloth: modeling and measurement". InACM Transactions on Graphics (TOG) 2011 Aug 7 (Vol. 30, No.4, p. 71). ACM. https://doi.org/10.1145/1964921.1964966

[19] E. Miguel, D. Bradley, B. Thomaszewski, B. Bickel, W. Matusik, M.A. Otaduy and S. Marschner. "Data-driven estimation of cloth simulation models". In Computer Graphics Forum 2012 May (Vol. 31, No. 2pt2, pp. 519-528). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03031.x

[20] K. S. Bhat, C.D. Twigg, J. K. Hodgins, P. K. Khosla, Z. Popović S. M. Seitz. "Estimating cloth simulation parameters from video". In Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation 2003 Jul 26 (pp. 37-51). Eurographics Association.

[21] K. L. Bouman, B. Xiao, P. Battaglia, W. T. Freeman. "Estimating the material properties of fabric from video". In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision 2013 (pp. 1984-1991). https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.455

[22] Fabric Analyzer by Browzwear. https://browzwear.com/products/fabric-analyzer

[23] G. Cirio, J. Lopez-Moreno, D. Miraut, M. A. Otaduy. "Yarn-level simulation of woven cloth. ACM Transactions on Graphics (TOG). 2014 Nov 19;33(6):207. https://doi.org/10.1145/2661229.2661279

[24] M. J. D. Powell. "Direct search algorithms for optimization calculations," Acta Numerica 7, 287-336 (1998). https://doi.org/10.1017/S0962492900002841

[25] S. G. Johnson, "The NLopt nonlinear-optimization package". http://ab-initio.mit.edu/nlopt.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración del grupo de investigación GMRV-MSLab de la Universidad Rey Juan Carlos y de la Empresa Desilico, sin cuya ayuda no habría sido posible la realización del presente trabajo.