

Mecanismo Planar 2R

Con articulaciones complacientes para simulación de caminata bipeda

JUAN F. LÓPEZ-PRIETO ⁽¹⁾, JHONATAN D. PIZA ⁽²⁾, EDGAR H. SEPÚLVEDA ⁽³⁾,
VANESSA A. SORA ⁽⁴⁾, RICARDO E. RAMÍREZ ⁽⁵⁾.

(1) juflopezpr@unal.edu.co

(2) jdpizar@unal.edu.co

(3) ehsepulvedao@unal.edu.co

(4) vasorac@unal.edu.co

(5) reramirez@unal.edu.co

Grupo de Plataformas Robóticas UN-ROBOT
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Mecanismo Planar 2R

Con articulaciones complacientes para simulación de caminata bípeda

RESUMEN

Palabras clave:
actuadores elásticos en serie, optimización, caminata bípeda, mecanismo sub-actuado, articulaciones complacientes.

En general las aplicaciones relacionadas con la investigación en caminata bípeda han sido orientadas a la simulación de la biomecánica del movimiento humano. El propósito en este trabajo fue la investigación, diseño e implementación de un modelo que cumpla con las características necesarias para el control, rigidez en las articulaciones y administración de energía en mecanismos 2R para caminata humana. Con el prototipo se investigará en control de fuerza y torque para mecanismos sub-actuados y con control de articulaciones complacientes. El proyecto se enfocó principalmente en el diseño de actuadores elásticos rotativos en serie (RSEA) para cada articulación. Los RSEA permiten la reducción de energía en el funcionamiento y una suavidad de movimiento, además de una fidelidad en la medición de torque llevada a cabo mediante la deflexión angular del resorte. El sistema cuenta con posibilidad de restringir el movimiento para simular los ángulos usados por una pierna humana en la caminata, así como también es capaz de generar rutinas de movimiento para evaluación del mismo mecanismo y trayectorias requeridas en investigación, para esto se debe tener en cuenta que variables como fuerza, torque y velocidad fueron implementadas a una escala de 1:1.5 en relación con las magnitudes reales de una pierna humana y a una escala de 1:12 con respecto a la masa.

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de tareas en la vida cotidiana de una persona, presentan una complejidad que salen a luz cuando se quieren imitar mediante un mecanismo o un robot. La tarea de caminar, como lo hace un ser humano común, ha sido uno de los retos de la robótica, por lo cual diferentes compañías e instituciones académicas están enfocando sus recursos en investigación orientada a dicha problemática. Humanoides como ASIMO y ATLAS han logrado satisfactoriamente lograr una caminata bípeda pero aún no han logrado imitar el movimiento eficiente de los humanos al caminar [2]. La estrategia que usan radica en mantener su centro de masa a la misma altura, por lo que para ello siempre deben permanecer con los pies planos al suelo, lo que les permite tener el centro de presión de las reacciones de los pies en los mismos pies evitando así una rotación. El término sub-actuado hace referencia a un mecanismo que tiene más grados de libertad que actuadores. Por lo tanto por definición un robot que camina sería sub-actuado ya que el contacto con el suelo no equivale a un mecanismo de actuación [3]. Cuando el pie del robot hace contacto con el suelo y permanece plano permite que se restrinja un grado de libertad en esa posición por lo que el robot quedaría en ese momento totalmente actuado, es decir con el mismo número de grados de libertad que de actuadores, permitiéndole así desempeñar cualquier tarea que un robot totalmente actuado pueda hacer.

Como alternativa se están desarrollando mecanismos que se asimilen más al movimiento real de una pierna humana, por lo tanto reducen significativamente el consumo de energía. En primer lugar se han incluido actuadores como los SEA (Series Elastic Actuators) que presentan una mayor tolerancia a impactos y un mayor almacenamiento de energía, entre otros. Lo que es conveniente cuando la altura del centro de masa permanece constante ya que los impactos al caminar se pueden considerar despreciables, pero cuando esta altura varía como en la caminata humana, estos impactos deben ser amortiguados [4]. Otro de los objetivos es tratar de lograr un menor consumo de energía imitando el compor-

tamiento presentado en una pierna real, en la cual el mecanismo siempre se encuentra actuado.

En la marcha humana existen intervalos de la trayectoria donde solo la gravedad actúa sobre la pierna, dando a lugar a un mecanismo que estaría actuado cuando se requiera solamente. Este concepto que puede ser catalogado como sub-actuado a trozos, está siendo investigado en institutos como el MIT, donde su principal aplicación está basada en la implementación de prótesis. Actualmente existen robots que están usando el concepto de SEA para su locomoción. Entre estos se encuentran el robot Flame, el M2V2, el BAXTER, entre otros [5]. Debido a esto se realizó un mecanismo sub-actuado (serial-elástico) que permite asemejar el movimiento de una pierna humana.

II. CONCEPTOS PRELIMINARES

1. Ciclo de marcha humana

El ciclo de la marcha humana es el periodo de tiempo o la secuencia de eventos o movimientos durante la locomoción desde la cual un pie hace contacto con el suelo hasta que este vuelve a hacer contacto con el suelo. Este ciclo es un patrón repetitivo que incluye pasos y zancadas. Un paso es solo un movimiento singular, mientras que la zancada es la realización de todo el ciclo. El tiempo de un paso es el tiempo empleado desde que un pie toca el piso hasta que el otro pie toca el piso.

Cada ciclo se puede dividir en varios movimientos pero en general tiene dos fases. La fase de apoyo y la fase de balanceo

a) La fase de apoyo:

Esta es la parte del ciclo de la marcha humana en la que el pie está en contacto con el suelo. Constituye el 60 % del ciclo de marcha y se da en 5 movimientos del pie, comenzado por el contacto inicial, este es el momento en que el talón toca el suelo pero los dedos del pie aun no lo tocan. Luego se tiene la respuesta a la carga, donde el peso es transferido a la pierna de referencia. Esto es importante para soportar el peso, absorción de choques y el avance

progresivo, seguido de un Apoyo Medio, esta abarca el alineamiento y el balanceo del peso del cuerpo en el pie de referencia, y Apoyo Final, donde el talón del pie se levanta mientras que los dedos del pie siguen en contacto con el suelo, para terminar el Despegue de los dedos, los dedos del pie de referencia se levanta y se balancean en el aire. Este es el principio de la fase de balanceo del ciclo de marcha.

b) La fase de balanceo:

En esta fase el pie de referencia no está en contacto con el suelo y se balancea en el aire. Constituye el 40 por ciento restante del ciclo y puede dividirse en dos fases

Fase de aceleración: comienza cuando se despegan los dedos del pie hasta que se llega a un balanceo medio. La pierna balanceada realiza un movimiento acelerado hacia adelante debido al impulso del cuerpo en la misma dirección.

Fase de desaceleración: comienza desde un balanceo medio hasta que el talón del pie de referencia toca el piso. En esta fase se frena la velocidad del movimiento del cuerpo con el fin de colocar el pie en el piso controladamente

2. Actuadores elásticos

Los SEA (Actuadores elásticos en serie) proporcionan muchos beneficios en el control de la fuerza de robots en entornos sin restricciones. Estos beneficios incluyen una alta fidelidad de la fuerza, extremadamente baja impedancia, baja fricción y buen ancho de banda de control de fuerza. Emplean una arquitectura de diseño mecánico que va en contra de la máquina común de diseño principal de "más rígido es mejor". Un elemento compatible se coloca entre el tren de engranajes y carga accionada intencionadamente para reducir la rigidez del actuador.

Un sensor de posición mide la deflexión, y la salida de la fuerza se calcula con precisión usando la ley de Hooke ($F = Kx$). Un bucle de control de servos entonces el actuador a la fuerza de salida deseada. El actuador resultante tiene tolerancia a golpes inherente, alta fuerza de la fidelidad y la extremada-

mente baja impedancia. Estas características son deseables en muchas aplicaciones, incluyendo robots con patas, exoesqueletos para la amplificación de la actuación humana, brazos robóticos, interfaces hápticas y suspensiones adaptativas. Sin embargo los SEA no son los únicos actuadores elásticos que han sido implementados satisfactoriamente en las prótesis de extremidades bajas. Además de estos también se han usado PAE (Actuadores Elásticos en Paralelo) en el diseño de prótesis de tobillo actúadas, así como el uso de tendones para manipular los SEA. Por lo cual es de bastante interés registrar los requerimientos para un actuador elástico paralelo (PEA) y una combinación de (SE + PEA) resortes serie y paralelo. Se ha encontrado que una PEA puede reducir PP, además, en comparación con el SEA por la pre-carga del resorte en la fase de vuelo. Esto reduce también el par máximo. Pero esta carga necesita energía adicional para tener un aumento en el ER en comparación con el SEA. El concepto PEA SE + puede disminuir aún más PP. Con eso, la ER es menor con el PEA pero mayor que para la EAE.

Todos estos dispositivos sacan provecho de los beneficios de los SEA, pero la cíclica y menuda relación torque-ángulo tipo resorte observada durante su locomoción presenta una oportunidad para innovar la arquitectura SEA. Un ejemplo del comportamiento de una articulación de torque cíclico y tipo resorte ocurre durante la postura temprana de las fases de flexión y extensión de la rodilla de la locomoción humana. Aquí, el SEA implementado con una rigidez en serie aproximadamente igual a la pendiente de la relación torque-ángulo durante esta fase (conocida también como cuasi-rigidez) proveería una reducción en el trabajo requerido por el motor eléctrico dentro del SEA.

En otras palabras la completa relación torque-ángulo podría ser prestada solamente por la rigidez en serie, requiriendo únicamente el torque de reacción para ser generado por el motor, a una velocidad despreciable. Esto provee un decrecimiento en la energía eléctrica requerida por el motor. Sin embargo, debido a que los motores eléctricos no son eficientes a bajas velocidades, se tiene que

hacer mejoras adicionales. Estas mejoras incluyen lo que son actuadores elásticos embragables (CSEA O CPEA según sea la disposición), que mediante un embrague o freno permiten que el resorte usado en el mecanismo aumente las características de torque-ángulo pasivamente. Esto resulta ventajoso al habilitar el uso de una relación de transmisión menor y un motor menos poderoso, manteniendo las propiedades cinemáticas y cinéticas de la fase de apoyo del ciclo de marcha humana. La desventaja de los CPEA es que como el motor está acoplado directamente a la salida, no puede obtener las ventajas de las propiedades de un SEA como si lo hace un CSEA.

Más aún, porque la locomoción humana incluye movimientos espontáneos de alta potencia (por ejemplo: subir escaleras y transiciones de sentarse y pararse), es esencial poder proveer un salida significativa de torque y velocidad.

Por esto el propósito del mecanismo CSEA es tomar la ventaja de las propiedades de un SEA, así como proveer la habilidad de almacenar energía en un resorte en serie. El embrague se le añade para permitir bajo consumo eléctrico mientras puede ofrecer el torque de reacción necesario [7].

III. REQUISITOS DE DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA

En el desarrollo del mecanismo lo primero que se planteó fue la necesidad a suplir y el problema a resolver.

B. Definición de la necesidad

Obtener un mecanismo sub-actuado de dos grados de libertad con el cual se pueda realizar investigación sobre caminata bípeda en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

C. Planteamiento del problema

Construcción de un mecanismo 2R (2 actuadores, 2 articulaciones) con articulaciones seriales elásticas, con posibilidad de tener un sistema sub-actuado a trozos, y que simule los movimientos planares de la cadera y la rodilla de una pierna humana.

Adicionalmente el sistema debe poseer control de movimiento y opcionalmente control de fuerza en las articulaciones.

D. Especificaciones de Ingeniería

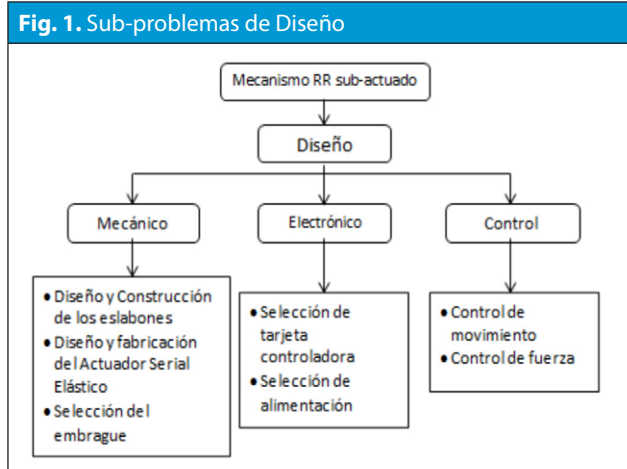
El mecanismo debía cumplir las siguientes especificaciones de ingeniería:

TABLA 1. ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA

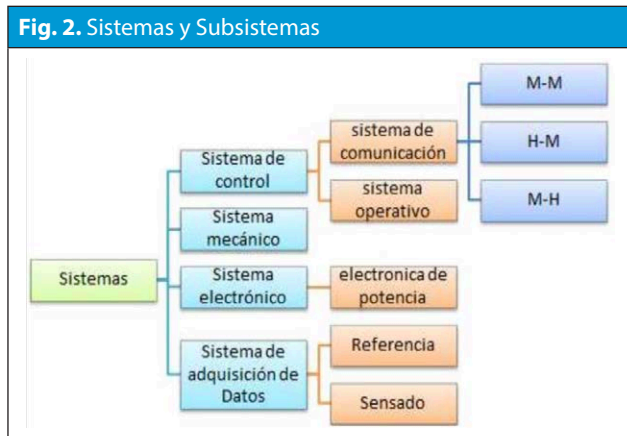
<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>
Torque requerido	Debe garantizar que mecanismo pueda mover su propio peso y llegar a todos los puntos deseados.
Potencia requerida	Al ser dos articulaciones la potencia a suministrar debe ser mayor a 21,6 W
Peso de los componentes	No debe superar 2310 g.
Angulo de rotación de la cadera	130° para flexión (Movimiento hacia delante de la cadera) y 30 ° para extensión (Movimiento hacia atrás de la cadera).
Angulo de rotación de la rodilla	150° para flexión (Movimiento hacia atrás de la rodilla) y 20 ° para extensión (Movimiento hacia adelante de la rodilla).
Dimensiones	Los eslabones no deben ser mayor de 22 cm; El tamaño de los motores a usar se encuentra en la hoja de datos de cada uno de ellos
Materiales	Para los eslabones es el de prototipado rápido ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). El material del resto de componentes (motores, resortes, acoples, etc...) será los indicados en la hoja de datos de cada uno de estos.
Flexibilidad de manufactura	Fabricación de los eslabones: impresión 3D, La manufactura de los otros componentes está estipulada según el tipo de componente que se adquiera en su hoja de datos.
Consumo de energía	El menor posible
Costos	\$500000
Desempeño de controlador	Debe tener un desempeño total, sin sobrepicos y con un tiempo de respuesta reducido para la aplicación; al igual que este debe ser versátil para distintos movimientos.
Estabilidad del controlador	Debe garantizar estabilidad para todo tipo de configuraciones del mecanismo y debe ser capaz de soportar perturbaciones e incertidumbres paramétricas.

IV. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para poder llevar a cabo el diseño del sistema se dividió el problema en 3 grandes partes, como se puede observar en la Fig 1.

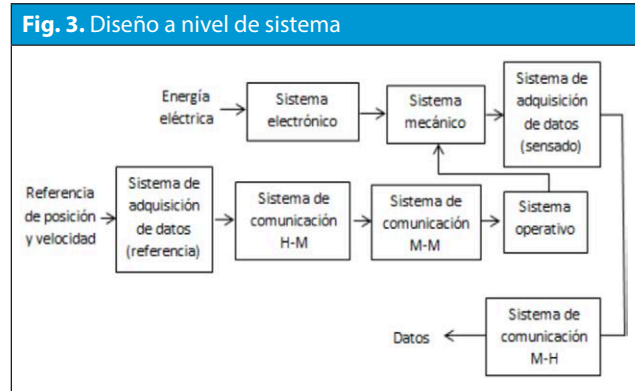


Y se prosiguió con el desarrollo de cada una de ellas. Se tuvieron en cuenta métodos de diseño y de elección de soluciones, como tablas combinatorias, prioridad del cliente, sombreros del pensamiento, diagramas de descomposición funcional etc. A medida que se fueron descartando las opciones menos acertadas para el prototipo se fueron teniendo en cuenta los sistemas (véase Fig 2) y sus funciones en el prototipo final (Véase Fig 3) para tomar una decisión definitiva.



Al final de todo este proceso se consiguió una idea principal dominante donde el prototipo se realiza sobre una estructura móvil donde se ajusta la base del mecanismo. Esta sujeción se hace mediante tornillos que al desplazar la estructura desplaza

el mecanismo. La base y el acople de los servomotores dynamixel a los eslabones se hace mediante un diseño de brackets o soportes personalizados que permiten ajustar los motores a los tubos huecos que corresponde a los eslabones. El elemento serial elástico usado es un resorte torsional que está personalizado.



V. DISEÑO EN DETALLE

1. Parte mecánica

A. Resortes de Torsión:

Partiendo de las topologías usadas en los resortes torsionales fabricados en la universidad Medico de Roma [1][2], se diseña un resorte personalizado y que se ajuste a los parámetros deseados. Inicialmente se considera un resorte con la topología mostrada en la figura 4 ajustando sus dimensiones para que pueda ser utilizado en las articulaciones del mecanismo, y realizando agujeros para que pueda ser ensamblando al motor (internos) y al soporte móvil de la articulación (externos).



Se realizó un análisis por elementos finitos usando esta geometría cuyas dimensiones principales son 80 mm de diámetro y 3 mm de espesor, estableciendo como elemento fijo el anillo interior de resorte y como elemento móvil el anillo exterior al cual se le aplicó un torque de 2,5 Nm, que es el torque máximo que le puede aplicar cada motor Dynamixel MX128, cuando se alimenta 12V. El máximo esfuerzo Von Mises resultante fue 746 GPa, por lo que se utilizó un material que estuviera por encima valor y que fuera de fácil adquisición. El material escogido fue el acero 4340 en estado bonificado que tiene una resistencia a fluencia de 800 MPa y que se consigue en el mercado nacional con estas características.

Sin embargo el desplazamiento angular obtenido correspondía a solo 2 grados, valor que no era suficiente para el valor objetivo de la rigidez angular buscada. Debido a estas razones se realizó un proceso de optimización de la tipología del resorte, y de las dimensiones de los elementos laminares interiores pero conservando el mismo diámetro y espesor inicial. El resultado de esta optimización dio lugar al resorte que se puede ver en la figura 5. Puede apreciarse que se cambió la disposición y numero de agujeros externos debido en primer lugar a que ya no se dispone de un anillo exterior completo y que de esta forma se distribuye mejor los esfuerzos al ensamblar el resorte al mecanismo.

Fig. 5. Resorte torsional optimizado



El hecho de que el anillo exterior no esté completo permite una mayor deflexión del resorte sin que se incremente de manera significativa los esfuerzos. De igual manera la disposición en la que se ubicaron los elementos laminares interiores hace que se

tenga una mayor rotación entre los anillos sin que dé lugar a una colisión entre estos. Para el análisis de este resorte se tuvieron en cuenta dos escenarios distintos. En el primer escenario el anillo interior es fijo y el anillo exterior es móvil y a este último se le aplica el torque de 2,5Nm.

Las figuras 6 y 7 muestran el análisis de desplazamiento y el análisis de resistencia Von Mises respectivamente. Puede notarse que en la simulación se ensambló un anillo exterior adicional al del resorte para representar la estructura del mecanismo y para aplicar sobre este anillo el torque determinado.

Fig. 6. Simulación FEA de desplazamiento

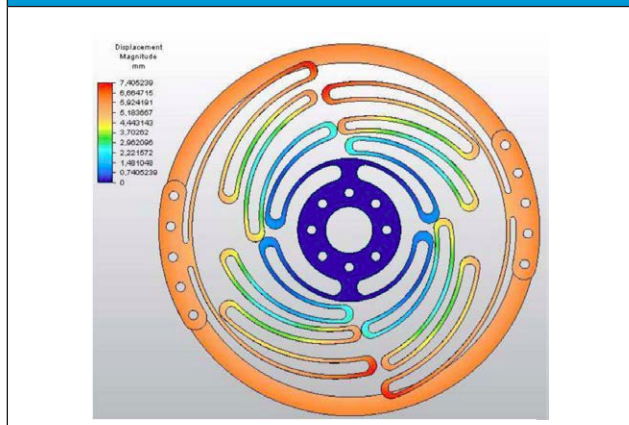
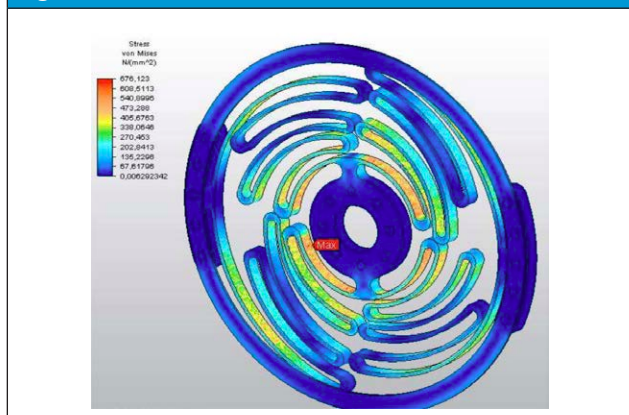


Fig. 7. Simulación FEA de resistencia Von Mises



La figura 6 muestra el desplazamiento lineal más no angular del resorte. Para hallar este último se hizo un análisis geométrico a partir del cual se dedujo la fórmula a continuación, donde θ representa el desplazamiento angular medido en radianes, L representa el desplazamiento lineal y R el radio

medido desde el centro del resorte hasta el punto donde se aplica el torque.

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{L^2}{2R^2} \right)$$

De esta manera para este primer escenario se tiene un desplazamiento lineal de 5,9 mm para el anillo exterior, un radio de 37,5 mm y por lo tanto un desplazamiento angular de 9,02 grados. La resistencia máxima Von mises que tiene que soportar el resorte se encuentra en los elementos laminares interiores más cercanos al centro como se ve en la figura 7 y su valor corresponde a 676 MPa. Con esto usando de material el acero 4340 bonificado se tiene un factor de seguridad de 1.2 que es aceptable para ser un prototipo. El escenario 2 plantea que ahora el anillo exterior esta fijo y el que se mueve es el interior y por lo tanto se le aplica el torque de 2.5 Nm. Las figuras 8 y 9 muestran el análisis de desplazamiento y el análisis de resistencia Von Mises respectivamente.

Fig. 8. Simulación FEA de desplazamiento

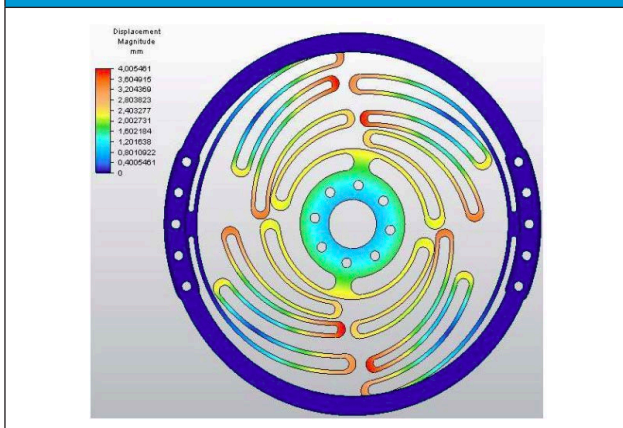
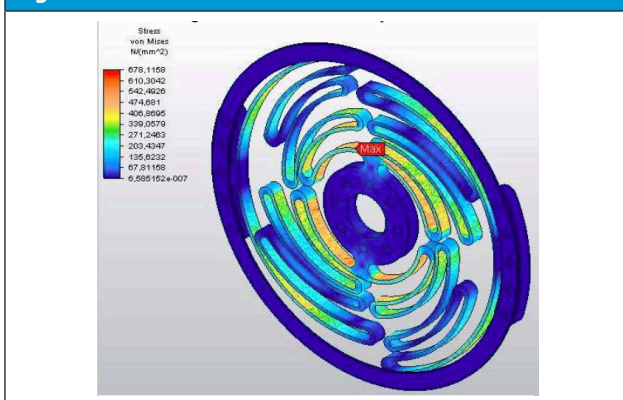


Fig. 9. Simulación FEA de resistencia Von Mises



Para este segundo escenario se tiene un desplazamiento lineal de 2,5 mm para el anillo interior, un radio de 8 mm y por lo tanto un desplazamiento angular de 8,96 grados. La resistencia máxima Von mises que tiene que soportar el resorte se encuentra al igual que en el primer escenario en los elementos laminares interiores más cercanos al centro como se ve en la figura 9 y su valor corresponde a 678 MPa, por lo que el factor de seguridad corresponde a 1,2.

B. Eslabones de Muslo y caña:

Entre los criterios para seleccionar el tipo de eslabón a usar se encontraban que fueron ligeros, de poco material, y lo suficientemente resistente para soportar las articulaciones y lo que ellas cargaban. Debido a esto se seleccionaron tubos huecos de aluminio que adicionalmente permitían pasar los cables de los motores y sensores a través de ellos.

C. Soportes de articulación:

Los soportes para simular la articulación se diseñaron principalmente para poder conectar los eslabones e ubicar los elementos internos de la articulación. Como el mecanismo desarrollado es un mecanismo 2R se tienen 2 articulaciones, las cuales son cadera y rodilla. Cada articulación consta de dos soportes que pueden girar entre sí mediante la ayuda de dos rodamientos. La figura 10 muestra el soporte interno de la articulación rodilla. Este soporte dispone a cada lado de una base para apoyar la parte interna de los rodamientos, y un espaciamiento para que no haya rozamiento cuando se monte el soporte externo.

Los soportes internos están diseñados para llevar en su interior los motores dynamixel MX-28, por lo que la geometría interna del soporte está basada en la geometría del motor. Por esta razón se puede distinguir las guías para ingresar el motor y los agujeros para ajustarlo. Las bases donde se apoyan los rodamientos tienen un agujero considerable, en un lado para conectar el resorte de torsión con la salida del eje del motor, y en el otro para fijar la carcasa del sensor de desplazamiento angular al soporte. El agujero del sensor se puede identificar por tener un agujero rectangular debajo de este, por donde se

insertan los cables de este. En la figura 11 se puede ver el soporte interno para la articulación cadera donde puede detallarse ese agujero.

Fig. 10. Soporte interno articulación rodilla



Fig. 11. Soporte interno articulación cadera



Cabe resaltar que a diferencia del soporte interno de la rodilla, este soporte no va conectado a un tubo, sino que es la base donde está apoyado todo el mecanismo y por eso la estructura obtenida. Los soportes externos pueden verse en las figuras 12 y 13 donde se muestran para las articulaciones rodilla y cadera respectivamente. Estos soportes cuentan con agujeros internos para que se apoyen en la parte externa de los rodamientos. Además de esto tienen en uno de sus lados una geometría para poder ensam-

blar el resorte y al otro lado un soporte para ajustar la parte móvil del sensor de desplazamiento angular.

Fig. 12. Soporte externo articulación rodilla



Fig. 13. Soporte externo articulación cadera



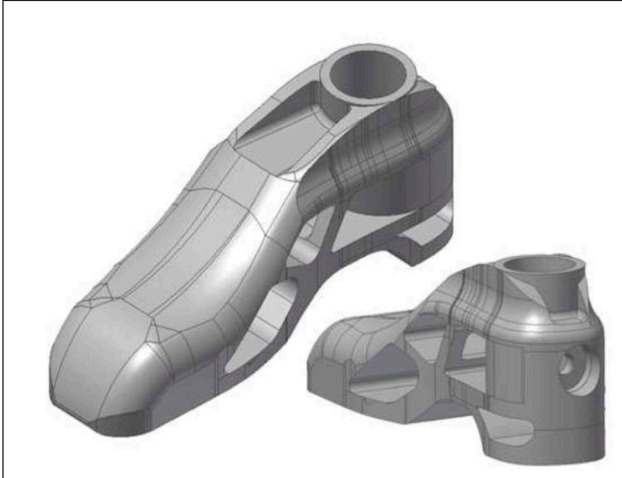
Los dos soportes externos son prácticamente iguales en todo menos en la camisa utilizada para ajustar el tubo a donde van conectados. Esto puesto que el eslabón del muslo es más grueso que el eslabón de la caña, al igual que en una persona.

D. Pie

La pieza que representa el pie se diseñó inicialmente con fines estéticos, pero luego se ajustó su peso para que pudiera ser congruente con la proporción establecida en el mecanismo. Esta pieza se puede ver en la figura 14. Como el mecanismo

inicial cuenta con solo dos articulaciones se diseñó de esta manera pero con la opción de poder ser reemplazada por un conjunto articulación el cual permita al mecanismo dar un paso usando la punta del pie y el talón como ocurre en la marcha humana.

Fig. 14. Pie inicial



2. Parte electrónica

A. Sensores de desplazamiento angular

Debido a los cálculos realizados para el resorte de torsión se tiene un desplazamiento máximo de 9 grados cuando se aplica una carga de 2,5 Nm. Este desplazamiento angular es bastante pequeño por lo cual es necesario de un sensor de desplazamiento angular de alta resolución, y además que la tarjeta de control que reciba la señal del sensor también lo sea. El diseño de los sensores se hace por selección buscando los parámetros que más se ajustaran lo buscado. El sensor seleccionado (AMS22B5A1BLASL334S-ND) es un sensor diseñado para aplicaciones industriales que cuenta con una resolución de 12 bits, la cual es la misma de la tarjeta de control OPEN CM9.

B. Servomotores Dynamixel y Tarjeta de Control

Como se mencionó anteriormente uno de los requisitos que debía cumplir el mecanismo es que debía funcionar con servomotores Dynamixel de referencia MX-28T, estos servomotores tienen un torque máximo de 2.5 Nm, una resolución de encoder de 0.088° y tienen un control PID incorporado que

les permite llegar a posiciones dadas por la persona que los esté usando.

VI. MANUFACTURA DEL PROTOTIPO

Por medio del proceso de prototipado rápido (impresión 3D) se fabricaron las partes de las articulaciones de la cadera y la rodilla, al igual que el pie partiéndolas en sub-piezas para el ahorro de material; durante este proceso se tuvo en cuenta un relleno del 50% en material ABS para mantener las especificaciones de peso y resistencia. La máquina usada para el prototipado es conocida como Maquero Replicator 2X. Para imprimir las piezas completas de los soportes era necesario usar bastante material de soporte, el cual era un gasto innecesario, por lo que se imprimieron en secciones para luego ensamblarlas mediante adhesivos además de un refuerzo mecánico con tornillos. Los eslabones fueron cortados de tubos de aluminio circulares a la medida específica. Por su parte, los resortes de torsión se fabricaron siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Al material en bruto barra de Acero 4340 se le realizó un refrentado por una cara para la sujeción.
- 2) Posteriormente se corta el material con segueta de aproximadamente 1 cm de espesor.
- 3) Los discos obtenidos se refrentan hasta quedar del espesor aproximado mayor de 4mm.
- 4) Los discos pasan por un proceso de rectificado para que obtengan el espesor final de 4mm cada uno.
- 5) Por el proceso de electroerosión se cortan los resortes de los discos obtenidos con la forma ya antes mencionada.
- 6) Por medio del proceso térmico de relevo de tensiones a la temperatura de 500°C se pasan los resortes durante una hora y se dejan enfriar dentro del horno para aliviar sus esfuerzos internos debido a los anteriores procesos.

El resultado de estos procesos dio a lugar a los resortes de torsión personalizados que se pueden ver en la figura 15.

Por último al tener todas las piezas listas se realiza el proceso de ensamblaje, los soportes se ensamblan partir de las sub-piezas obtenidas del prototipado rápido, se unen las articulaciones con los servomotores y los sensores, luego cada conjunto de articulación se une con su respectivo eslabón y por último se atornillan los resortes a la articulación y a los servomotores. En la figura 16 se muestra el ensamble finalizado de la articulación rodilla.

Fig. 15. Resortes de torsión personalizados.



Fig. 16. Ensamble articulación rodilla



Luego de tener las dos articulaciones ensambladas se ensamble la parte del pie y se obtiene la pierna completa como se puede ver en la figura 17.

Fig. 17. Mecanismo Pierna ensamblado



Al finalizar el ensamblaje mecánico se procede a realizar las conexiones específicas con la alimentación, la tarjeta de control, los sensores y los servomotores respectivamente para proceder a realizar las pruebas de funcionamiento.

VII. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para corroborar el funcionamiento del mecanismo se realizaron dos pruebas con trayectorias de movimiento, una prueba para el funcionamiento elástico de las articulaciones y una prueba de la sensórica.

A. Pruebas con trayectorias de movimiento

Estas pruebas consistieron en realizar dos trayectorias que podría realizar una pierna humana y mirar cómo se comportaba el mecanismo, las trayectorias fueron un paso y la simulación de golpear un balón repetidas veces en el aire. El mecanismo funcionó correctamente en las dos trayectorias y la elasticidad de las articulaciones hace que los movimientos se vean más suaves, al igual que soporta más las vibraciones y los golpes ya sea por la energía potencial que pueda tener en algún punto el mecanismo o por una fuerza que lo golpee externamente.

B. Prueba de la elasticidad de las articulaciones

En esta prueba se restringió el movimiento de los motores aumentando su torque al máximo, luego se movió cada eslabón comprobando que el resorte torsional si permite el movimiento en ambos sentidos y al liberar su energía elástica devuelve los eslabones al punto donde se inicia el movimiento.

C. Prueba de la sensórica

Por medio de una sencilla prueba se comparan los datos arrojados en desplazamiento angular de los servomotores Dynamixel y de los sensores en cada articulación; los datos son distintos por consiguiente el resorte si se encuentra deformado dependiendo el movimiento y por supuesto la dinámica del mecanismo mismo.

VIII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron mejoras a las ideas iniciales que se plantearon, permitiendo de esta forma obtener un prototipo adecuado para las necesidades de la universidad. Con esto se pudo experimentar con los actuadores seriales elásticos, que son un campo de investigación en el cual no se había trabajado aun en la universidad y que poseen muchas características especiales que permiten que el mecanismo asemeje el movimiento de la pierna. Una de las ventajas de este tipo de actuadores es que el movimiento de las articulaciones es más suave, lo cual ayuda a reducir las vibraciones y las perturbaciones causadas por fuerzas externas, también ayuda a evitar daños dentro de los servomotores, ya que al ser un resorte puede almacenar energía causada por torque externos. Sin embargo como este tipo de resortes no se consigue en el mercado comúnmente se procedió al diseño y manufactura de estos, por lo que se incrementaron los costos y el tiempo de desarrollo.

Adicionalmente el hecho de usar este tipo de resorte hizo que fueron necesarios otros elementos como lo fueron los rodamientos y los sensores de desplazamiento angular. Los rodamientos se usaron principalmente para que los eslabones de la pierna se apoyaran sobre su misma estructura y no sobre el motor, como se hace normalmente o sobre el resorte en este caso. Esto se hizo para que el resorte no soportara carga radial ya que si esto fuera así la deformación de este sería muy diferente. Los sensores de desplazamientos fueron necesarios debido a que había una diferencia angular entre el resorte y el eslabón en cada articulación que el sensor integrado en el motor Dynamixel MX28 no podía medir.

Por otro lado, la manufactura de las piezas, específicamente en las que se usó prototipado rápido modificaron levemente las dimensiones y los pesos

con los que se había diseñado por lo que fue necesario de recalcular algunos parámetros para que la pierna pudiera hacer las trayectorias indicadas. Con esto se pudo obtener el resultado esperado, claro está que con una proyección a mejoras. Gracias a lo anterior y continuando con el trabajo ya realizado, se empezará a realizar un control híbrido de fuerza y desplazamiento para el mecanismo 2R con actuadores seriales elásticos, se estudiará la dinámica del mecanismo debido a las articulaciones elásticas, los cambios que se tienen respecto a un mecanismo 2R con articulaciones rígidas, también se caracterizará el resorte torsional mencionado en este artículo con el fin de conocer su ley de deformación versus torque y así poder determinar sus futuros usos en otras aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] G. Carpino, D. Accoto, F. Sergi, N. L. Tagliamonte, E. Guglielmelli, "A novel compact torsional spring for Series Elastic Actuators for assistive wearable robots", *ASME Journal of Mechanical Design*, 134:121002, pp. 1-10, 2012
- [2] D. Accoto, G. Carpino, F. Sergi, N. L. Tagliamonte, E. Guglielmelli, "Design and Characterization of a Novel High-Power Series Elastic Actuator for a Lower Limb Robotic Orthosis", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10:359, 2013
- [3] Michael D. Taylor, "A Compact Series Elastic Actuator for Bipedal Robots with Human-Like Dynamic Performance", master's thesis, tech. report CMU-RI-TR-11-31, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, August, 2011
- [4] FLORIDA INSTITUTE FOR HUMAN. "Series Elastic Actuators"<http://www.ihmc.us/groups/sea/>
- [5] Tweney Dylan. Online. tomado de , <http://www.robotikka.com/robots-inspirados-en-la-naturaleza-ii-flame>.
- [6] Vaughan CL. Theories of bipedal walking: an odyssey. *J Biomech* 2001:513-523.
- [7] E. J. Rouse, L. M. Mooney and H. M. Herr, "Clutchable series-elastic actuator: Implications for prosthetic knee design", *International Journal of Robotics Research*, 2014, in press