

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 963 835**

51 Int. Cl.:

G06C 15/00 (2006.01)

G06C 21/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.12.2015** **PCT/US2015/068359**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.07.2017** **WO17116482**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.12.2015** **E 15912213 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.09.2023** **EP 3398024**

54 Título: **Sistemas de computación mecánica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
02.04.2024

73 Titular/es:

CBN NANO TECHNOLOGIES INC. (100.0%)
145 Richmond Road
Ottawa, ON, CA

72 Inventor/es:

MERKLE, RALPH C.;
FREITAS, ROBERT, A.;
RYLEY, JAMES;
MOSES, MATTHEW y
HOGG, TAD

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 963 835 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistemas de computación mecánica

5 La presente invención se refiere al campo de la tecnología de la computación o los sistemas de computación relacionados con dispositivos de propósito general que pueden programarse para llevar a cabo un conjunto de operaciones aritméticas o lógicas. Más específicamente, la presente invención está dirigida a la computación mecánica, en donde un ordenador mecánico está construido a partir de componentes mecánicos en lugar de componentes electrónicos.

10 Los métodos para la computación mecánica son conocidos en la técnica anterior. (Svoboda, "Computing Mechanisms and Linkage", New York, Den Publications, 1965; Bradley, "Mechanical Computing in Microelectromechanical Systems (MEMS)", Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea, AFIT/GE/ENG/03-04, Ohio, 2003; Sharma, Ram y col., "Mechanical Logic Devices and Circuits", 14th National Conference on Machines and Mechanisms [NaCoMM-09], 2009) Sin embargo, si bien el primer ejemplo de un diseño Turing completo es probablemente el motor analítico de Babbage, que se describió
 15 en 1837 (aunque nunca se construyó), la gran mayoría de las propuestas anteriores para la computación mecánica no son sistemas Turing completos. Más bien, son dispositivos de propósito especial no destinados a abordar la computación de propósito general en absoluto, o son sistemas o mecanismos parciales, que carecen de capacidades cruciales, que les permitirían proporcionar sistemas Turing completos. Por ejemplo, con respecto a los sistemas o mecanismos parciales, los ejemplos conocidos incluyen puertas lógicas construidas a partir de partes personalizadas, kits o incluso
 20 juguetes como Lego. Téngase en cuenta que las puertas lógicas mecánicas solas, incluso las universales, no permiten por sí mismas la computación Turing completa; también se requieren algunos medios de memoria. La computación Turing completa requiere un medio para la lógica combinatoria, así como un medio para la lógica secuencial.

La literatura sobre computación mecánica también incluye implementaciones a escala molecular de diversos componentes computacionales (nuevamente, frecuentemente no son sistemas Turing completos), incluidos (Drexler, "Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation," Nueva York, John Wiley & Sons, 1992; Hall, "Nanocomputers and Reversible Logic", Nanotechnology, 1994; Heinrich, Lutz y col., "Molecule Cascades", Science, 2002; Remon, Ferreira y col., "Reversible molecular logic: a photophysical example of a Feynman gate", ChemPhysChem, 12, 2009; Orbach, Remade y col., "Logic reversibility and thermodynamic irreversibility demonstrated by DNAzyme-based Toffoli and Fredkin logic gates", PNAS, 52, 2012; Roy, Sethi y col., "All-Optical Reversible Logic Gates with Optically Controlled Bacteriorhodopsin Protein-Coated Microresonators", Advances in Optical Technologies, 2012).

El documento US-2011/278365 A1 describe un método de fabricación de un ordenador sin ensamblaje. Para evitar la etapa de ensamblaje típica, se produce una pluralidad de componentes físicos mediante fabricación aditiva en un patrón tridimensional de manera que, en el momento en que se completa dicha fabricación, dichos componentes ya están ensamblados en dicho patrón como la totalidad o parte de dicha máquina. La máquina está adaptada para realizar al menos un cálculo no trivial que se efectúa, al menos en parte, mediante el movimiento de al menos uno de dichos componentes.

El documento US-7.414.437 B1 describe un ordenador nanomecánico y, más precisamente, un elemento de conmutación a nanoescala electromecánica que puede construirse fácilmente usando técnicas de IC estándar. El elemento de conmutación eléctrica comprende al menos un primer pilar a nanoescala que se extiende hacia arriba desde un sustrato entre los primeros electrodos opuestos para flexionarse entre los primeros electrodos, y al menos un segundo pilar a nanoescala que se extiende hacia arriba desde el sustrato entre los segundos electrodos opuestos. El segundo pilar a nanoescala se acopla al primer pilar a nanoescala para flexionarse con el primer pilar a nanoescala alternativamente hacia y lejos de los segundos electrodos alternativos influenciados por la flexión del primer pilar a nanoescala, por lo que la flexión del primer pilar a nanoescala promueve una transferencia de carga entre los segundos electrodos opuestos a través del segundo pilar a nanoescala.

El documento Mahboob y col., "Interconnect-free parallel logic circuits in a single mechanical resonator", NATURE COMMUNICATIONS, (20110215), vol. 2, doi:10.1038/ncomms1201, página 198 describe un resonador electromecánico que emplea multiplexación por división de longitud de onda con activación y detección piezoeléctricas.

El documento Sharma y col., "Mechanical logic Devices and Circuits", (20090000), URL: http://www.nacomm09.ammindia.org/NaCoMM-2009/nacomm09_final_pap/R/RCA18.pdf, (20160218) describe dispositivos y circuitos lógicos mecánicos.

Si bien los diseños anteriores para la computación mecánica varían en gran medida, las propuestas anteriores capaces de realizar la computación Turing completa (a diferencia de los dispositivos de propósito limitado) tienden a responder a un número sustancial de partes básicas (o "primitivas") que incluyen varios tipos de engranajes, ejes y cojinetes de movimiento lineal, resortes (u otros medios de almacenamiento de energía, p. ej., algunos diseños usan bandas de caucho), retenes, trinquetes y gatillos, u otros mecanismos que tienen el potencial de disipar energía, aumentando a la vez la complejidad del dispositivo. Téngase en cuenta que dichos diseños requieren estas diversas primitivas para funcionar correctamente; no son opcionales.

Que el uso de muchos tipos de partes básicas en un sistema mecánico puede complicar el diseño, la fabricación y el ensamblaje, así como también reducir potencialmente la fiabilidad, es obvio. Reducir la complejidad de los mecanismos es un objetivo común de la invención.

Téngase también en cuenta que muchos de los mecanismos utilizados en propuestas anteriores para la computación mecánica generan una fricción sustancial. Con la eliminación de dichos mecanismos se obtendrían beneficios más allá de la reducción de la complejidad del dispositivo, que incluyen la reducción del consumo de energía. Sin embargo, según la prevalencia de mecanismos generadores de fricción en los sistemas de computación mecánica, es difícil solucionar este problema.

Quizás menos evidente que la fricción son otros modos de disipación de energía, incluidas las vibraciones, que pueden, p. ej., crear calor o generar radiación acústica. Por ejemplo, los trinquetes y gatillos, retenes u otros mecanismos que implican el impacto relativamente incontrolado de una parte de un mecanismo sobre otra pueden conducir a vibraciones que disipan energía, por lo que la eliminación de estos tipos de mecanismos también sería beneficiosa.

El calor residual es un problema bien conocido para los sistemas computacionales, electrónicos o mecánicos, que disipan mucha más energía por operación de bit de la que se requiere en la teoría. Teóricamente, se pueden realizar cálculos donde la energía disipada es solo de $\ln(2) k_B T$ por operación de bit irreversible. Esto se denomina límite de Landauer (Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process", IBM Journal of Research and Development, 1961) y ha sido confirmado experimentalmente (Bert, Arkelyan y col., "Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics", Nature, 7388, Nature Publishing Group, 2012).

Téngase en cuenta que el límite de Landauer solo se aplica a operaciones irreversibles. Las operaciones reversibles pueden, en teoría, disipar energía cero. Si bien los ordenadores convencionales generalmente no se construyen sobre hardware reversible, se ha estudiado la computación reversible durante décadas (Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process", IBM Journal of Research and Development, 1961; Bennett, "The Thermodynamics of Computación", International Journal of Theoretical Physics, 12, 1973; "Logical reversibility of computation", IBM Journal of Research and Development, 6, 1973; Toffoli, "Technical Report MIT/LCS/TM-151-Reversible Computing", Autómatas, Lenguajes y Programación, Séptimo Coloquio, Noordwijkerhout, Países Bajos, Springer Verlag, 1980; Toffoli y Fredkin, "Conservative Computing", International Journal of Theoretical Physics, 3/4, 1982; Bennett y Landauer, "The Fundamental Physical Limits of Computation", Scientific American, 1985; Feynman, "Quantum Mechanical Computers", Foundations of Physics, 6, 1986). Para una visión general de la computación reversible desde una perspectiva de software, véase (Perumalla, "Introduction to Reversible Computing", CRC Press, 2014).

Ya sean reversibles o irreversibles, serían bastante útiles nuevos diseños de sistemas computacionales mecánicos que tengan el potencial de reducir la complejidad del dispositivo (junto con el diseño asociado, los costes de fabricación y ensamblaje) y usar menos energía por operación de bit que los diseños existentes. No estando sujetos al límite de Landauer, los diseños reversibles tienen en última instancia el potencial de utilizar la menor cantidad de energía. Sin embargo, los sistemas de computación existentes utilizan energía tan por encima del límite de Landauer que incluso los diseños irreversibles podrían mejorar en gran medida el estado de la técnica.

Sobre la base de lo anterior, es un objetivo proporcionar un mecanismo de computación mecánica binario que reduzca las desventajas de la técnica anterior, descritas anteriormente.

El objetivo se resuelve mediante un mecanismo de computación mecánica binario según la reivindicación 1. Las reivindicaciones dependientes analizan las realizaciones preferidas de la invención.

Según la invención, un mecanismo de computación mecánica binario está provisto de un bloque de anclaje y un conjunto, configurado para realizar una operación lógica combinatoria y/o una operación lógica secuencial, conjunto que solo requiere primitivas de lógica de eslabón mecánico, primitivas de lógica de flexión mecánica y/o primitivas de lógica de cableado mecánico. Una o más de dichas primitivas definen una o más entradas para datos, codificados por la posición física de las entradas,

una o más de dichas primitivas definen una o más salidas para datos, codificados por la posición física de las salidas, en donde

las primitivas se conectan entre sí para permitir o evitar selectivamente el movimiento de otras primitivas con respecto al bloque de anclaje basadas en la posición física de la una o más entradas, de modo que una o más salidas son el resultado de la operación lógica en la una o más entradas.

Los mecanismos de computación mecánica según la invención tienen una menor disipación de energía, un menor número de partes básicas y otras ventajas sobre los sistemas anteriores. Se describen múltiples realizaciones que incluyen lógica de eslabón mecánico, lógica de flexión mecánica y lógica de cableado mecánico, junto con paradigmas de diseño (que incluyen diseños mecánicos, principios y un sistema de clasificación novedoso que categoriza los sistemas como tipos 1 a 4) que enseñan cómo aplicar los principios generales a otras realizaciones.

Para una comprensión más completa de la presente invención, ahora se hace referencia a las siguientes descripciones tomadas junto con los dibujos adjuntos, en los que:

- 5 La Figura 1 representa una vista lateral de una junta rotatoria molecular.
- La Figura 2 representa una vista lateral de un eslabonamiento de cuatro barras.
- La Figura 3 representa una vista superior de un mecanismo que puede servir como base para una puerta NAND o AND.
- 10 La Figura 4 representa una vista superior de un mecanismo que puede servir como base para una puerta NOR, NAND, AND, u OR.
- La Figura 5 representa una vista superior de una puerta XOR.
- 15 La Figura 6 representa una vista superior de una puerta de Fredkin.
- La Figura 7 representa una vista superior de una cerradura coplanaria en el estado (0,0).
- La Figura 8 representa una vista superior de una cerradura coplanaria en el estado (1,0).
- 20 La Figura 9 representa una vista superior de una realización alternativa de una cerradura coplanaria en el estado (0,0).
- La Figura 10 representa una vista superior de una realización alternativa de una cerradura coplanaria en el estado (1,0)
- 25 La Figura 11 representa una vista 3/4 de una cerradura no coplanaria en el estado (0,0).
- La figura 12 representa una vista superior de una cerradura no coplanaria en el estado (0,0).
- La Figura 13 representa una vista 3/4 de una cerradura no coplanaria en el estado (1,0).
- 30 La Figura 14 representa una vista superior de una cerradura no coplanaria en el estado (1,0).
- La Figura 15 representa una vista 3/4 de una cerradura no coplanaria en el estado (0,1).
- 35 La Figura 16 representa una vista superior de una cerradura no coplanaria en el estado (0,1).
- La Figura 17 representa una vista superior de una balanza con una entrada de 0.
- La Figura 18 representa una vista superior de una balanza con una entrada de 1 con un anclaje en la parte superior.
- 40 La Figura 19 representa una vista superior de una balanza con una entrada de 1 con un anclaje en la parte inferior.
- La Figura 20 representa una vista superior de una balanza doble binaria con entradas (1,0).
- 45 La Figura 21 representa una vista superior de una balanza doble binaria con entradas (1,1).
- La Figura 22 representa una vista superior de una puerta de conmutación.
- La Figura 23 representa una vista superior de una puerta NAND basada en cerraduras y balanzas.
- 50 La Figura 24 representa una vista superior de una puerta de Fredkin basada en cerraduras y balanzas.
- La Figura 25 representa una vista superior de una celda de registro de desplazamiento en su estado en blanco.
- 55 La Figura 26 representa una vista superior de una celda de registro de desplazamiento después de que se ha proporcionado la entrada pero antes de que una señal de reloj se establezca en alto.
- La Figura 27 representa una vista superior de una celda de registro de desplazamiento después de que se ha proporcionado la entrada y se ha establecido una señal de reloj en alto.
- 60 La Figura 28a representa una vista superior de la mitad izquierda de un registro de desplazamiento de dos celdas.
- La Figura 28b representa una vista superior de la mitad derecha de un registro de desplazamiento de dos celdas.
- 65 La Figura 29 representa una vista superior de un grupo de cancelación.

La Figura 30 representa una vista superior de una cerradura basada en flexión.

La Figura 31 representa una vista superior de una polea de MCL y mecanismos asociados.

5 La Figura 32 representa una vista lateral de una polea de MCL y mecanismos asociados.

La Figura 33a-Figura 33c representan vistas superiores de diversos estados de una realización de una cerradura de MCL.

La Figura 34 representa una vista 3/4 de una manilla que puede usarse para crear una cerradura.

10 La Figura 35 representa una vista 3/4 de dos manillas que forman una cerradura en el estado (0,0).

La Figura 36 representa una vista 3/4 de una cerradura en el estado (0,1).

15 La Figura 37 representa una vista 3/4 de una cerradura en el estado (1,0).

La Figura 38 representa una vista superior de un óvalo de MCL.

20 La Figura 39 representa una vista superior de una balanza de MCL en el estado (0,0).

La Figura 40 representa una vista superior de una balanza de MCL en el estado (0,1).

La Figura 41 representa una vista superior de una balanza de MCL en el estado (1,0).

25 La Figura 42 representa una vista superior de una balanza de MCL en el estado (1,0) después del accionamiento.

Definiciones

Las siguientes definiciones se usan en la presente memoria:

30 “Bloque de anclaje” significa una o más estructuras rígidas a las que se pueden fijar partes básicas o conjuntos de nivel superior, y que también pueden servir como disipadores de calor. Téngase en cuenta que incluso cuando se escribe en singular, puede haber más de un bloque de anclaje, según lo determinen las necesidades de diseño. La forma de un bloque de anclaje puede ser arbitraria (“bloque” no debe entenderse en el sentido de que la estructura es necesariamente rectangular, o cualquier forma simple). Un bloque de anclaje puede fabricarse de cualquier material apropiado, sin limitarse a, pero incluyendo cualquiera de los materiales sugeridos en la presente memoria a partir de los cuales podrían fabricarse partes básicas. Se supone que un bloque de anclaje está presente según sea necesario, ya sea que se indique explícitamente o no.

40 “Anclado” significa fijado a un bloque de anclaje, o que se vuelve inmóvil con respecto a otras partes o mecanismos básicos relevantes. El anclaje puede ser permanente o condicional (p. ej., dependiendo de las entradas de datos o señales de reloj), y una parte anclada de manera condicional puede denominarse según su estado condicional relevante (es decir, si la parte no está anclada en una dada situación, puede denominarse no anclada, y viceversa).

45 “Atómicamente preciso” significa donde la identidad y la posición de cada átomo en una estructura se especifican por diseño. Las estructuras, tales como cristales o cuasicristales de origen natural o fabricados en masa, que tienen irregularidades superficiales, impurezas, agujeros, dislocaciones u otras imperfecciones, no son atómicamente precisas. Atómicamente preciso puede incluir, pero no necesariamente, el conocimiento de la composición isotópica.

50 Una “balanza” es una estructura que transmite movimiento a través de un lado o recorrido de un mecanismo frente a otro. Pueden usarse balanzas, p. ej., para realizar cálculos y enrutar datos. Una balanza puede tener cualquier número de entradas y salidas, algunas de las cuales pueden anclarse, o anclarse de manera condicional (como cuando se conectan a una cerradura). La palabra “balanza” y formas de la misma también se pueden usar en su sentido tradicional (p. ej., masas o fuerzas iguales “se equilibran” entre sí) según lo dicte el contexto.

55 Una “parte básica” es un bloque de construcción fundamental, o primitiva, de un mecanismo o sistema computacional. Por ejemplo, las partes básicas de MCL son eslabones y juntas rotatorias, las partes básicas de MFL son eslabones y flexiones, y las partes básicas de MCL son cables, poleas y manillas. La “parte básica” es sinónimo de “primitiva”, y la distinción entre una parte básica y un mecanismo es que las partes básicas, al menos en sus implementaciones más simples (p. ej., una polea es una parte básica porque puede ser monolítica, pero algunas implementaciones de una polea podrían requerir un eje como una parte separada), no son obviamente divisibles lógicamente en partes más pequeñas.

60 Un “cable” es una estructura flexible que se utiliza para transmitir fuerzas de tracción, p. ej., directamente o a través de poleas.

65

“Coaxial” se refiere a juntas rotatorias que comparten el mismo eje de rotación. El término también se puede aplicar al concepto análogo en mecanismos coplanarios que tienen múltiples juntas que comparten arcos comunes de movimiento.

“Sistema de computación” y formas del mismo que incluyen “sistema computacional” significa un sistema para llevar a cabo cálculos de propósito general. Dichos sistemas son Turing completos. Los dispositivos solo capaces de resolver un problema único o una clase limitada de problemas, tales como planímetros, sintetizadores o analizadores armónicos, solucionadores de ecuación, generadores de funciones y analizadores diferenciales, no son capaces de realizar cálculos de propósito general y, por lo tanto, no son “sistemas de computación”. Las fuentes de energía, los motores, los generadores de señales de reloj u otros componentes auxiliares de los medios computacionales Turing completos no forman parte de un sistema de computación. Pueden interconectarse diferentes tipos de sistemas computacionales. Por ejemplo, un sistema MLL podría tomar su entrada, proporcionar su salida o interactuar de otra manera con otros componentes, sistemas, sensores o fuentes de datos de computación mecánica o electrónica, si bien dicho sistema solo constituiría un sistema computacional MLL si los propios componentes MLL proporcionan medios computacionales Turing completos.

“Coplanario” se refiere a un mecanismo que se mueve en uno o más planos paralelos. El término se usa para diferenciar implementaciones de mecanismos esencialmente planas (pero potencialmente multicapa) de las que utilizan movimiento en planos no paralelos. La distinción es en gran medida una cuestión de comodidad para la denominación y visualización, ya que los mecanismos descritos en la presente memoria pueden construirse de manera coplanaria o no coplanaria.

“Eslabón de datos” significa un eslabón que ayuda a transferir datos, de un lugar a otro. Un eslabón de datos puede denominarse simplemente “eslabón” cuando el contexto deja claro el significado.

“Conmutación seca”, aplicada a los componentes computacionales mecánicos descritos en la presente memoria, significa que no se aplica ninguna fuerza a los mecanismos que no son libres de moverse de alguna manera.

Una “flexión” es un tipo de cojinete que permite el movimiento a través de la flexión de un material, en lugar de deslizarse o rodar.

“Horquilla” significa una rama en una línea que permite que un eslabón de datos se acople a más de un otro eslabón de datos. Una horquilla puede, p. ej., permitir el copiado de una entrada/salida en múltiples enlaces o líneas.

“Entrada” significa los datos, por ejemplo codificados por posición física, suministrados a un mecanismo, p. ej., con el fin de almacenar los datos en la memoria, transmitir los datos a otro lugar, realizar una lógica combinatoria en los datos, o accionar el mecanismo (p. ej., a través de una señal de reloj). Por una variedad de razones, incluido el hecho de que la entrada a un mecanismo puede ser la salida de otro, por las cuales algunos mecanismos usan los mismos datos como entradas y salidas (p. ej., un registro de desplazamiento circular u otros mecanismos con un bucle de retroalimentación), y porque algunas realizaciones permiten la reversibilidad, puede haber poca distinción entre “entradas” y “salidas”, siendo el uso de un término o el otro más para fines didácticos. Por lo tanto, independientemente de qué término se use, se supone que ambos se usan, si corresponde, en un contexto determinado.

“Línea” significa una secuencia de eslabones de datos conectados. También se llama “línea de datos”

“Eslabón” significa una estructura o cuerpo rígido conectado a una o más juntas rotatorias.

Una “cerradura” es una estructura con una pluralidad de entradas donde una o más de las entradas que se establecen en algún intervalo predefinido de valores dan como resultado que las otras entradas se bloqueen. Por ejemplo, en una cerradura de dos entradas, al establecerse una de las entradas en un valor distinto de cero, la otra entrada se bloquea hasta que la entrada distinta de cero vuelva a cero. En una cerradura binaria de dos entradas, el valor distinto de cero que se establece normalmente sería 1, pero el mecanismo de cerradura puede acoplarse bien antes de que la entrada realmente alcance 1 (p. ej., una entrada de 0,1 en una entrada puede ser suficiente para bloquear la otra entrada).

“Puerta lógica” incluye puertas tradicionalmente irreversibles, tales como AND, CNOT, NAND, NOT, OR, NOR, XNOR, XOR, puertas reversibles, tales como puertas de Fredkin y de Toffoli, u otros mecanismos que proporcionan lógica combinatoria (p. ej., implementaciones reversibles de puertas tradicionalmente irreversibles o puertas lógicas de propósito especial).

“MCL” significa Lógica de cableado mecánico (Mechanical Cable Logic), un paradigma para crear sistemas computacionales y mecanismos de los mismos, usando cables, manillas y poleas.

Un “mecanismo” es una combinación de partes básicas que forman un conjunto de un nivel de complejidad entre la de una parte básica y un sistema computacional. Por ejemplo, en MLL, líneas, cerraduras, balanzas, puertas lógicas y registros de desplazamiento son todos componentes, como lo son cualesquiera subconjuntos que incluyen más de una parte básica. Debido a que son partes básicas, los eslabones y las juntas rotatorias, o cualquier otra parte básica, no son mecanismos.

“MFL” significa lógica de flexión mecánica (Mechanical Flexure Logic), un paradigma para crear sistemas computacionales y mecanismos de los mismos, usando eslabones y flexiones.

“ML,L” significa Lógica de eslabonamiento mecánico (Mechanical Linkage Logic), un paradigma para crear sistemas computacionales y mecanismos de los mismos, usando eslabones y juntas rotatorias. Téngase en cuenta que, por ser la primera y la realización más ampliamente descrita, se proporcionan detalles para MLL que no se repiten necesariamente para MFL, MCL u otras realizaciones. Por ejemplo, la sincronización se describe ampliamente en el contexto de MLL, pero no en otras realizaciones. Debido a la naturaleza lógica y mecánica análoga de las diversas realizaciones presentadas, y teniendo en cuenta las enseñanzas de la presente memoria, resultará evidente cómo aplicar la información presentada para una realización a otras realizaciones.

“No coaxial” se refiere a dos o más juntas rotatorias que no comparten el mismo eje de rotación, o el concepto análogo en mecanismos coplanarios.

“Salida” significa los datos, por ejemplo codificados por la posición física, proporcionados por un mecanismo. Consulte “Entrada” para detalles y comentarios adicionales sobre la intercambiabilidad de los dos términos.

Una “polea” es un mecanismo que facilita el encaminamiento y/o transmisión de fuerzas por uno o más cables. Tradicionalmente, las poleas giran a medida que el cable se mueve, pero esto no es necesario; p. ej., un cable podría deslizarse por la superficie de una polea si la disipación de energía incurrida fuera lo suficientemente baja. Las poleas pueden anclarse o no anclarse. Las poleas no ancladas pueden moverse libremente según lo dicten sus cables acoplados, o sus movimientos pueden estar restringidos por una pista, ranura u otros medios de guía.

“Junta rotatoria” significa una o más conexiones entre cuerpos rígidos que permiten el movimiento de rotación alrededor de un eje. Las juntas rotatorias pueden anclarse o no anclarse.

“Eslabón de soporte” significa un eslabón que proporciona soporte físico o restricción cinemática a otros eslabones.

“Turing completo” tiene su significado estándar como se usa en el campo de la ciencia computacional, con la salvedad de que, dado que los sistemas del mundo real tienen memoria, tiempo y otros parámetros limitados, se reconoce que existen tales limitaciones prácticas y, por lo tanto, se puede considerar que el término “Turing completo”, cuando se aplica a un sistema real, incluye tales limitaciones (lo que da como resultado aquello que puede denominarse más precisamente un “autómata lineal acotado”).

Introducción

En la presente memoria se muestra, en primer lugar, que un sistema computacional mecánico puede diseñarse únicamente a partir de dos partes básicas: eslabones y juntas rotatorias (más un bloque de anclaje al que se pueden fijar estas partes básicas; esto se asumirá posteriormente y no se menciona necesariamente cada vez), usando un paradigma de diseño denominado Lógica de eslabonamiento mecánico (“MLL”). Posteriormente, los paradigmas de ML,L se generalizan para mostrar otras formas en las que pueden diseñarse sistemas de computación mecánica simples y eficientes, tales como Lógica de flexión mecánica (“MFL”) y Lógica de cableado mecánico (“MCL”) (cualquiera de los cuales también podría usarse en combinación). Parte de esta generalización también incluye la descripción de un nuevo sistema de clasificación basado en formas en las que los sistemas de computación mecánica pueden disipar energía.

Estos nuevos paradigmas pueden simplificar el diseño y la construcción de mecanismos y sistemas de computación mecánica, y reducir o eliminar las principales fuentes de disipación de energía, tales como la fricción y la vibración, funcionando a la vez a velocidades computacionales útiles. Dichos sistemas computacionales también pueden diseñarse para funcionar de manera reversible. Estos y otros factores ofrecen diversos beneficios superiores a los de los sistemas de computación propuestos anteriormente.

Las realizaciones de la invención proporcionan todos los mecanismos necesarios para crear sistemas computacionales Turing completos. Por ejemplo, el uso de MLL, esto incluye líneas, puertas lógicas, cerraduras y balanzas, y mecanismos más complejos tales como registros de desplazamiento, cada uno de los cuales no requiere partes básicas distintas de los eslabones y juntas rotatorias. Otras realizaciones (p. ej., MFL y MCL) proporcionan partes básicas y mecanismos análogos para permitir también la creación de sistemas computacionales Turing completos.

Computación mecánica energéticamente eficiente

Como se analiza en la presente memoria, los sistemas de computación mecánica pueden disipar energía de varias maneras, incluida la fricción (que incluye el arrastre causado por el movimiento térmico a nivel atómico) y las vibraciones, lo que puede deberse no solo al hecho de hacer funcionar un sistema mecánico lo suficientemente rápido como para excitar sus frecuencias de resonancia (algo que puede evitarse controlando la velocidad del reloj), sino también a los impactos entre partes o liberaciones de energía relativamente no restringidas. Los ejemplos de dichos impactos entre partes y liberaciones de energía relativamente incontroladas incluyen los movimientos por encaje a presión de los mecanismos de trinquete y gatillo, y retenes.

Teniendo en cuenta estos problemas, se definen cuatro categorías para dispositivos de computación mecánica:

Tipo 1: Dispositivos que almacenan energía potencial (p. ej., en un resorte) y que luego liberan esta energía de manera no limitada mediante los grados de libertad computacionales. Los dispositivos que usan trinquetes y gatillos, o retenes, son ejemplos de un dispositivo de tipo 1, ya que se supone que la liberación de energía almacenada por el trinquete y el gatillo o retén no está vinculada a los grados de libertad computacionales. En dicho dispositivo, si, p. ej., estuvieran presentes un trinquete y un gatillo, mientras que el movimiento por encaje a presión del trinquete podría ocurrir con una periodicidad controlada por un sistema de reloj, la liberación de energía de ese movimiento por encaje a presión no estaría vinculada a la frecuencia de reloj. Más bien, la velocidad de la liberación de energía sería una función de, p. ej., la fuerza aplicada a, y la masa de, el trinquete, independientemente de la velocidad computacional general del sistema. La colisión resultante del gatillo con el trinquete podría generar vibraciones que desperdician energía.

Tipo 2: Dispositivos que almacenan energía potencial y luego liberan esta energía de una manera controlada por los grados de libertad computacionales. Por ejemplo, en los sistemas MLL descritos en la presente memoria, si se va a colocar un resorte entre eslabones en una línea, a medida que el sistema impulse la línea hacia adelante y hacia atrás, el resorte se comprimiría y se descomprimiría. Esta compresión y descompresión se produciría gradualmente, a la frecuencia impuesta por un reloj del sistema. Al resorte no se le permitiría hacer encajar a presión una parte no restringida en su lugar a una velocidad que, desde la perspectiva del reloj del sistema, es arbitraria. Más bien, el movimiento del resorte y las partes acopladas se rigen por los grados de libertad computacionales. Téngase en cuenta que también en el escenario anterior, el resorte es parte de un eslabonamiento continuo y, por lo tanto, no se produce ninguna colisión de partes como cuando un trinquete es impactado por su gatillo. Esto también puede ayudar a reducir la disipación de energía. E, incluso si se producen colisiones de partes (p. ej., consulte las descripciones de las manillas en los sistemas MCL), dado que la velocidad con la que se producen dichos contactos se puede acoplar a los grados de libertad computacionales, es posible elegir velocidades que no disipen cantidades inaceptables de energía (y, de hecho, al provocar dichos impactos con el reloj del sistema, que preferentemente usa una señal tipo sinusoidal, incluso una velocidad de conmutación relativamente rápida puede dar como resultado velocidades de la parte muy bajas en el momento del impacto).

Tipo 3: Dispositivos que no almacenan más que cantidades triviales de energía potencial, pero tienen partes con grados de libertad no triviales no restringidos. Por ejemplo, dependiendo de la implementación, los sistemas podrían crearse usando MLL donde, debido a una o más cerraduras que están en la posición en blanco (0,0), los eslabones conectados pueden moverse libremente de manera esencialmente aleatoria debido al ruido térmico, vibraciones del sistema u otras causas. Entre otros problemas, dicho movimiento sin restricciones puede dar como resultado el tener que gastar energía para ajustar periódicamente mecanismos a un estado conocido, para garantizar una operación fiable. (Téngase en cuenta que dichas situaciones pueden evitarse con sistemas diseñados adecuadamente, y esto se presenta solo como ejemplo).

Tipo 4: Dispositivos que no almacenan más que cantidades triviales de energía potencial y no tienen más que los grados de libertad sin restricciones triviales. Por ejemplo, un sistema MLL diseñado adecuadamente donde todo el movimiento se acopla, directa o indirectamente, a entradas de datos y/o al reloj del sistema. No se permite que los componentes “floten” libremente, como lo haría un eslabón conectado solo a una cerradura en el estado en blanco. Con respecto a la definición de grados de libertad sin restricciones “triviales”, esta se refiere a aquellos que ocurren en una porción suficientemente pequeña del sistema en general (p. ej., un tipo particular de mecanismo tiene este problema, pero el mecanismo es raro en el sistema en general), o a aquellos que ocurren con poca frecuencia, que no afectan materialmente la disipación de energía en general. Un ejemplo de grados de libertad no restringidos que ocurren con poca frecuencia sería cuando algunos mecanismos del sistema tienen grados de libertad temporalmente no restringidos durante un proceso de inicialización o reinicio. Es posible que dichos procesos solo sean necesarios con muy poca frecuencia en comparación con las operaciones de cálculo estándar y, por lo tanto, contribuirían muy poco a una disipación de energía del sistema. Con respecto a la definición de “trivial” cuando se usa en referencia a energía potencial, téngase en cuenta que todos los sistemas mecánicos almacenarán algo de energía potencial. Por ejemplo, en teoría, incluso los eslabones muy rígidos se deforman ligeramente cuando se les aplica fuerza. Suponiendo que no haya deformación permanente, técnicamente almacenan energía potencial. Dicho almacenamiento de energía potencial inevitable se considera trivial. El objetivo de los sistemas tipo 3 y tipo 4 es evitar sistemas que almacenan intencionalmente energía potencial para su posterior liberación, tal como en un sistema con resortes, donde esos resortes y su energía potencial se requieren para que el sistema funcione correctamente.

Téngase en cuenta que la falta de deformación sustancial no es la única manera de lograr un sistema de tipo 3 o tipo 4. Las flexiones pueden tener una deformación sustancial, pero pueden diseñarse para almacenar cantidades triviales de energía potencial total o neta, como se explica en la presente memoria. Estas categorías se ordenan generalmente por su potencial de eficiencia energética, siendo los dispositivos de tipo 1 los dispositivos menos eficientes y los de tipo 4 los más eficientes. Dicho esto, la eficiencia energética de los sistemas específicos depende de los detalles de implementación. Un sistema de tipo 2 podría ser menos eficiente que un sistema de tipo 3. Una implementación deficiente podría hacer que cualquier energía del sistema sea ineficiente. Debido al uso de trinquetes y gatillos, retenes, resortes u otros mecanismos que almacenan y luego liberan energía potencial de una manera no vinculada a los grados de libertad computacionales, todos los sistemas Turing completos preexistentes para la computación mecánica pueden clasificarse como de tipo 1.

Lógica de eslabonamiento mecánico

Un sistema MLL se construye a partir de varias partes básicas o primitivas. En las realizaciones descritas, estas son juntas rotatorias y eslabones, que juntos forman eslabonamientos mecánicos. Las juntas rotatorias y los eslabones se montan en un bloque de anclaje, y se pueden usar para crear mecanismos de orden superior tales como líneas de transmisión de datos, cerraduras y balanzas. Se pueden crear mecanismos de orden superior, incluidas las puertas lógicas (tanto reversibles como irreversibles) y registros de desplazamiento combinando cerraduras y balanzas, o se pueden implementar más directamente usando eslabones y juntas rotatorias. Esto es suficiente para construir un sistema computacional completo.

Para demostrar esto, utilizando solo eslabones y juntas rotatorias, se explica el diseño de líneas de datos, puertas lógicas, cerraduras y balanzas. Posteriormente, usando algunos de estos mecanismos, se describe la construcción de un registro de desplazamiento. Los registros de desplazamiento son simples, pero cuando se combinan con una o más puertas lógicas que proporcionan lógica combinatoria universal, contienen todos los elementos fundamentales requeridos para el cálculo. Si las partes básicas pueden construir un registro de desplazamiento y las puertas lógicas apropiadas, se deduce que puede construirse un sistema computacional completo.

Téngase en cuenta que la mayoría de los mecanismos descritos se adaptan a sistemas computacionales binarios. Como resultado, la mayoría de los eslabones se moverán entre dos posiciones permitidas. Sin embargo, existen algunas excepciones, tales como diseños donde, por ejemplo, cuando una entrada es 1, el mecanismo impulsa una o más entradas “hacia atrás” (usos de palabras tales como “avance”, “hacia atrás” y otras direcciones son convenciones didácticas solamente, ya que no es necesario utilizar direcciones particulares en los mecanismos reales, ni es necesario que dichas direcciones sean coherentes desde un mecanismo hasta el siguiente). En otras palabras, dada una entrada de dos bits que comienza en (0,0), una entrada de 1 podría hacer que el mecanismo termine en un estado tal como (1, -1) o (1, -0,5) en lugar de (1,0). Siempre que el sistema esté diseñado para manejar correctamente dicha cinemática, esto no tiene por qué ser un problema. Además, los eslabones internos en la implementación de diversos mecanismos pueden moverse entre más de dos posiciones permitidas, incluso si las entradas y salidas siguen siendo binarias. El término binario se usa para fines ilustrativos porque es el tipo más común de sistema computacional utilizado en los ordenadores convencionales. Obviamente, podrían construirse sistemas computacionales ternarios, cuaternarios u otros sistemas computacionales no binarios utilizando las enseñanzas contenidas en la presente memoria.

Los mecanismos descritos en la presente memoria se simularon o se representaron en diagramas, frecuentemente con Linkage v3 (gratuito desde www.languagesimulator.com), Autodesk Inventor 2015/2016 o, para modelos moleculares, HyperChem, GROMACS o Gaussian. Muchas de las figuras de la presente memoria representan subconjuntos tomados del contexto de un sistema computacional completo. Como resultado, no son necesariamente funcionales como se muestra. Por ejemplo, es posible que un mecanismo dado no esté completamente restringido como se ilustra porque, en un sistema completo, el mecanismo se fijaría a otros componentes para satisfacer las restricciones faltantes, o se fijaría a alguna manera de accionamiento (p. ej., una señal de reloj). A veces se ha omitido el enrutamiento realista de datos en favor de, p. ej., líneas rectas, para mayor claridad. Generalmente se omiten estructuras de soporte auxiliares, tales como bloques de anclaje, o eslabones que sirven solo para proporcionar rigidez (“eslabones de soporte”).

Algunos diagramas representan partes dentro de los mecanismos que no son partes básicas de MLL. El ejemplo más frecuente de esto es el uso de correderas lineales en modelos de Linkage. Esto es una comodidad programática ya que se requiere algún método para la conducción de entradas para ejecutar una simulación en Linkage. En un sistema real, las correderas lineales se reemplazarían, p. ej., por conexiones a entradas/salidas apropiadas, tales como líneas de datos o señales de reloj. Téngase en cuenta que el solucionador cinemático usado por Linkage v3 no tiene el concepto de ciclos de reloj, por lo que no puede conducir varias entradas secuencialmente. Y Linkage y otros programas pueden fallar en mecanismos válidos simplemente porque el solucionador no puede calcular correctamente la cinemática. Debido a estas y otras reservas, las figuras en la presente memoria no deben tomarse como mecanismos de trabajo completos, sino más bien como ejemplos didácticos que, dadas las enseñanzas contenidas en la presente memoria, pueden adaptarse fácilmente para crear mecanismos de trabajo y combinarse para crear sistemas computacionales completos.

Juntas rotatorias

La fricción en una junta rotatoria puede hacerse más pequeña y más pequeña a medida que el tamaño de la junta rotatoria es cada vez más pequeño. A escala molecular, una junta rotatoria que comprende dos átomos que giran alrededor de un enlace sencillo tiene potencialmente un área de contacto cero, y varias juntas rotatorias que giran alrededor del eje de enlaces químicos simples se han analizado y se ha encontrado que tienen muy poca fricción. Por ejemplo, los enlaces simples carbono-carbono, usando átomos de carbono montados en soportes de diamante, son una forma de crear una junta rotatoria que proporciona rotación con muy poca disipación de energía.

La Figura 1 representa un modelo molecular de una posible implementación de una junta rotatoria que se usa para sujetar un miembro rotatorio. Una estructura de soporte superior 101 y una estructura de soporte inferior 102, que se conectarían, p. ej., a un bloque de anclaje, en un dispositivo completo, se usan para conectar un conjunto de enlaces superior e inferior, a lo largo del mismo eje de rotación, a un miembro rotatorio 103. Los enlaces superiores incluyen un enlace simple 104 carbono-carbono superior, un enlace simple 105 carbono-carbono superior y un enlace triple 106 carbono-carbono superior. Los enlaces inferiores incluyen un enlace simple 107 carbono-carbono superior, un enlace simple 108 carbono-carbono inferior y un enlace triple 109 carbono-carbono inferior

La junta rotatoria se une a las estructuras de soporte mediante varios átomos de oxígeno, incluido el átomo 110 de oxígeno superior y el átomo 111 de oxígeno inferior. El miembro giratorio 103 como se representa es una losa de diamante aproximadamente circular, pero esta es solamente representativa, como lo son las otras estructuras. El miembro giratorio podría ser un eslabón, un volante (p. ej., para generar una señal de reloj), o cualquier otra cosa que deba rotar, en cualquier forma.

Las simulaciones de la dinámica molecular indican que, con o sin las unidades acetilénicas ilustradas por los átomos de carbono y el enlace triple 106 superiores y los átomos de carbono y el enlace triple 109 inferiores, esta estructura permite la rotación con un arrastre notablemente pequeño. Sin embargo, interponer una unidad acetilénica entre los enlaces simples circundantes reduce aún más la disipación de energía de dicha junta rotatoria.

Teniendo en cuenta este ejemplo, resultará obvio que las implementaciones variadas, incluidas otras estructuras moleculares, podrían proporcionar el mismo tipo de mecanismo. Por ejemplo, con pequeñas modificaciones al modelo representado en la Figura 1, los átomos de oxígeno ilustrados por el átomo 110 de oxígeno y el átomo 111 de oxígeno pueden reemplazarse por nitrógeno u otro elemento con una valencia, fuerza de enlace y propiedades estéricas adecuadas. De manera similar, el carbono podría reemplazarse con silicio u otros elementos apropiados. O, podrían usarse estructuras completamente diferentes, que incluyen nanotubos de carbono u otras estructuras, preferiblemente aquellas que pueden sujetar de forma rígida las juntas rotatorias a escala molecular.

Además, no es necesario que dicha junta rotatoria consista en solo una única unión o par (p. ej., superior e inferior) de uniones. Por ejemplo, en implementaciones más grandes, la junta rotatoria podría reemplazarse con un cojinete de joya en forma de V, un cojinete con elementos rodantes, fullerenos anidados (p. ej., nanotubos de carbono) o cualquiera de las muchas formas conocidas para permitir la rotación, preferiblemente con baja fricción. Además, pueden usarse múltiples juntas rotatorias coaxiales para crear una junta más fuerte (p. ej., usando una estructura similar a la del diseño interdigitado de una bisagra de puerta). Y, a escala molecular, la adición de juntas rotatorias adicionales en el mismo eje de rotación podría reducir aún más la barrera rotacional si se presta la debida atención a la simetría. Téngase en cuenta que si bien se puede formar una junta rotatoria usando una unión, la resistencia y la rigidez del dispositivo pueden beneficiarse de una parte rotatoria que se mantiene en dos lados, como se representa en la Figura 1, y/o usando múltiples uniones, tales como en el ejemplo de “bisagra de puerta”. Con respecto a las realizaciones a escala molecular, para facilitar la descripción, se puede hacer referencia a que las juntas rotatorias rotan alrededor de una unión simple, aunque en algunos casos sería más preciso decir que se pueden usar uniones múltiples para formar un único eje de rotación para la junta rotatoria general.

La magnitud de las barreras de rotación, el par de torsión requerido para superarlas, la longitud de los brazos de palanca (p. ej., eslabones) y el tiempo para que rote el eslabón a través del intervalo necesario de la junta rotatoria (y a cuánto asciende el intervalo) dependen del diseño de un sistema particular. Como ejemplo, las simulaciones de dinámica molecular muestran que la energía requerida para hacer rotar un eslabón conectado a una junta rotatoria molecular con una velocidad de rotación en radianes de 1×10^9 radianes/s y una temperatura de 180 K puede estar por debajo de 1×10^{-25} J. El límite de Landauer es $1,72 \times 10^{-21}$ J a 180 K. Este número está tan por encima de la cifra de 1×10^{-25} J para una rotación expresada en radianes de un eslabón alrededor de una junta rotatoria, que incluso mecanismos que utilizan muchas juntas rotatorias para realizar una operación de un único bit podrían hacerlo bajo el límite de Landauer. Además, se espera que el arrastre viscoso de las juntas rotatorias y la pérdida de energía de otros modos de vibración disminuyan rápidamente a medida que disminuye la temperatura de funcionamiento debido a que los fonones se congelan.

Eslabones

En su forma más básica, los eslabones son estructuras rígidas, similares a varillas, aunque en algunas implementaciones pueden tener formas diferentes o sustancialmente más complejas. En la mayor parte del análisis realizado en la presente memoria, que requiere estimaciones de valores tales como masa de eslabón, frecuencias de resonancia y conducción de calor, se asume que un eslabón está compuesto por una varilla de diamante de aproximadamente 20 nm de longitud y 0,5-0,7 nm de diámetro. Sin embargo, los eslabones podrían ser más grandes o más pequeños, o tener una forma completamente diferente (como se ve en los ejemplos de cerradura no coplanaria).

Una de las formas más pequeñas para implementar un eslabón sería la de utilizar un enlace covalente simple como un eslabón. Por ejemplo, hay muchas moléculas que tienen más de una posible configuración, y la transición entre configuraciones (“conformadoras”) podría constituir el movimiento de un eslabón. Un ejemplo específico es el ciclohexano, que tiene varias conformaciones posibles, que incluyen dos conformaciones de silla, la conformación de bote básico y la conformación de bote torcido. El cambio entre diferentes conformaciones puede ocurrir a través de la rotación del enlace (aunque otros cambios, tales como cambios en el ángulo o torsión del enlace, también pueden estar presentes y usarse), similar al de la junta rotatoria previamente descrita, y da como resultado el movimiento de uno o más de los átomos en la estructura.

Dicha capacidad de cambio de conformación molecular para propagarse a lo largo de distancias relativamente largas y a través de redes complejas se sabe que existe en biología, donde se denomina “diseminación de conformación”. (Bray y Duke, “Conformational spread: the propagation of allosteric states in large multiprotein complexes”, *Annu Rev Biophys Biomol Struct*, 2004), y resultará evidente que podrían diseñarse sistemas sintéticos

que funcionen bajo los mismos principios que para enlaces más grandes, pero usando solo un enlace simple como un eslabón. Dichos diseños podrían permitir longitudes de eslabón en el intervalo expresado en ángstrom.

Independientemente de la implementación exacta de eslabones y juntas rotatorias, una de las tareas básicas en un sistema computacional es mover los datos de un lugar a otro. Los sistemas ilustrativos descritos usan eslabones conectados por juntas rotatorias para mover datos. Si bien muchos tipos de eslabonamientos funcionarían, incluidos los eslabonamientos que proporcionan un verdadero movimiento en línea recta, los eslabonamientos de 4 barras se usan con frecuencia como una manera ilustrativa de restringir con precisión el movimiento de eslabón. La Figura 2 representa una vista lateral de dicho eslabonamientos de 4 barras (téngase en cuenta que algunas veces se denominan eslabonamientos de 3 barras, ya que la estructura de soporte puede o no considerarse una barra adicional), que comprende un bloque de anclaje 205, el eslabón 202 de soporte izquierdo, el eslabón 207 de soporte derecho y el eslabón 204 de datos, en donde el extremo inferior del eslabón 202 de soporte izquierdo se conecta al lado izquierdo del bloque de anclaje 205 mediante la junta rotatoria 203 anclada izquierda y el extremo inferior del eslabón 207 de soporte derecho se conecta al lado derecho del bloque de anclaje 205 mediante la junta rotatoria 206 anclada derecha, y el extremo superior del eslabón 202 de soporte izquierdo se conecta al lado izquierdo del eslabón 204 de datos mediante la junta rotatoria 201 izquierda superior y el extremo superior del eslabón 207 de soporte derecho se conecta al lado derecho del eslabón 204 de datos mediante la junta rotatoria 208 derecha superior. Se impide que la junta rotatoria 203 anclada izquierda y la junta rotatoria 206 anclada derecha se muevan entre sí mediante el bloque de anclaje 205. El eslabón 204 de datos transmite el movimiento de un eslabón de soporte a otro eslabón de soporte. El eslabón 202 de soporte izquierdo y el eslabón 207 de soporte derecho se muestran desplazados a la izquierda. Los eslabones de soporte inclinados hacia la izquierda colocan el eslabón 204 de datos en una posición a la izquierda de la junta rotatoria 203 anclada izquierda y la junta rotatoria 206 anclada derecha. Arbitrariamente, esta posición izquierda puede denominarse “0” o “baja”, mientras que si el eslabón de soporte izquierdo 202 y el eslabón de soporte derecho 207 estuvieran inclinados hacia la derecha, esa posición podría denominarse “1” o “alta”. Esto proporciona una base para un sistema binario de almacenamiento y transferencia de datos.

Resultará evidente, incluso en ausencia del símbolo de junta rotatoria anclada, que la junta rotatoria 203 anclada izquierda y la junta rotatoria 206 anclada derecha son juntas rotatorias ancladas porque terminan en el bloque de anclaje 205. En las figuras siguientes, es posible que el bloque de anclaje no se muestre explícitamente. En su lugar, se adopta frecuentemente la comodidad esquemática de representar las juntas rotatorias no fijas como un círculo en la intersección de múltiples eslabones (que se representan generalmente como líneas o barras rectas, aunque algunos pueden tener formas más complejas), mientras que las juntas rotatorias fijas o ancladas se representan como un círculo y un triángulo con líneas diagonales cortas en su base. En otras figuras, generalmente para reducir la complejidad, algunas de estas comodidades pueden cambiarse o eliminarse. Las descripciones de las figuras y el contexto harán evidente cómo se deben interpretar dichos diagramas.

Como ya se ha descrito, la información puede transmitirse a lo largo de la longitud de un único eslabón de datos. Sin embargo, puede ser útil una transmisión y enrutamiento más complejos de datos. Un eslabón de datos puede conectarse a cualquier número de otros eslabones de datos para continuar la transmisión de datos. La transmisión de datos puede continuar en línea recta a través de eslabones de soporte adicionales (aunque, en realidad, es solo un eslabón de datos más largo, puede ser útil incluir eslabones de soporte adicionales para aumentar la rigidez), o puede cambiar de dirección en las juntas rotatorias, en cualquier ángulo y en cualquier plano deseado. Y, un eslabón puede conectarse a múltiples otros eslabones no solo secuencialmente, sino también a través de estructuras de horquilla, copiando efectivamente los datos para su uso en múltiples ubicaciones. Esto proporciona una flexibilidad considerable en el enrutamiento de datos.

La transmisión de datos puede producirse en ambas direcciones. El movimiento de un primer eslabón de datos hace que se mueva un segundo eslabón de datos, y el movimiento del segundo eslabón de datos hace que el primer eslabón de datos se mueva. Esto significa que cada eslabón de datos en la cadena está vinculado a sus vecinos. Es posible hacer que todos los eslabones de datos en una cadena, que puede ser de cierta longitud significativa, compartan un movimiento común, una propiedad que puede utilizarse para compartir un único valor binario a lo largo de toda la longitud de la cadena. Un conjunto de eslabones conectados se denomina línea.

Escala

MLL podría implementarse utilizando partes básicas de prácticamente cualquier tamaño deseado. Por ejemplo, a escala macroscópica, se podría utilizar un mecanizado convencional o la impresión 3D, con, p. ej., cojinetes de joya en forma de V o cojinetes con elementos rodantes para las juntas rotatorias, y vigas o varillas convencionales para los eslabones. A una escala más pequeña, p. ej., la impresión 3D, técnicas basadas en litografía, o cualquiera de las otras formas muy conocidas en las que pueden fabricarse dispositivos NEMS/MEMS, podrían utilizarse para crear dispositivos con mecanismos en el intervalo de nanómetros a micras. A una escala aún más pequeña, los mecanismos MLL podrían ser de escala molecular. Debido a las frecuencias operativas más altas y la reducción de la disipación de energía que se tiende a lograr con las partes más pequeñas, los sistemas MLL se implementarían preferiblemente a escalas tan pequeñas como sea factible (tomando en cuenta factores tales como los requisitos de rendimiento y el presupuesto). Por esta razón, si bien la mayoría de las enseñanzas en la presente memoria son independientes de la escala, las estimaciones de disipación de energía se centran en una realización ilustrativa a escala molecular.

Los cojinetes, engranajes y rotores moleculares se han estudiado tanto teórica como experimentalmente, y la bibliografía representativa incluye (Han, Globus y col., "Molecular dynamics simulations of carbon nanotube-based gears", *Nanotechnology*, 1997; Kottan, Clarke y col., "Artificial Molecular Rotors", *Chem. Rev.*, 2005; Khuong, Dang y col., "Rotational dynamics in a crystalline molecular gyroscope by variable-temperature ^{13}C NMR, ^2H NMR, X-ray diffraction, and force field calculations", *J Am Chem Soc*, 4, 2007; Frantz, Baldrige y col., "Application of Structural Principles to the Design of Triptycene-Based Molecular Gears with Parallel Axes", *CHIMIA International Journal for Chemistry*, 4, 2009; Wang, Liu y col., "Molecular Rotors Observed by Scanning Tunneling Microscopy", *Three-Dimensional Nanoarchitectures*, 2011; Isobe, Hitosugi y col., "Molecular bearings of finite carbon nanotubes and fullerenes in ensemble rolling motion", *Chemical Science*, 3, 2013; Carter, Weinberg y col., "Rotary Nanotube Bearing Structure and Methods for Manufacturing and Using the Same", patente de EE. UU. n.º 9150405, 2015).

Los motores moleculares, aunque no necesariamente se requieren para accionar los sistemas MLL, son bastante comunes ahora que todos los libros y conferencias se dedican al tema. (Joachim y Rapenne, "Single Molecular Machines and Motors: Proceedings of the 1st International Symposium on Single Molecular Machines and Motors" Springer, 2013; Calle, Silvi y col., "Molecular Machines and Motors", *Topics in Current Chemistry*, Springer, 2014)

Además, ya existe la computación a escala molecular, en diversas formas (generalmente no Turing completas). (Heinrich, Lutz y col., "Molecule Cascades", *Science*, 2002; Reif, "Mechanical Computing: The Computational Complexity of Physical Devices" *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Springer-Verlag, 2009; Remon, Ferreira y col., "Reversible molecular logic: a photophysical example of a Feynman gate", *ChemPhysChem*, 12, 2009; Orbach, Remade y col., "Logic reversibility and thermodynamic irreversibility demonstrated by DNAzyme-based Toffoli and Fredkin logic gates", *PNAS*, 52, 2012; Roy, Sethi y col., "All-Optical Reversible Logic Gates with Optically Controlled Bacteriorhodopsin Protein-Coated Microresonators", *Advances in Optical Technologies*, 2012).

Además de otras técnicas presentes en la literatura, podrían crearse mecanismos y sistemas computacionales MLL a escala molecular utilizando, p. ej., la fabricación molecular mediante mecanosíntesis, o el ensamblaje de moléculas apropiadamente funcionalizadas utilizando equipos de tipo microscopía de fuerza atómica. La química o el autoensamblaje convencionales (incluidas las técnicas de tipo origami del ADN) también pueden ser una ruta factible para fabricar mecanismos MLL a escala molecular. Dado el número muy limitado de partes básicas requeridas (p. ej., eslabones y juntas rotatorias en MLL) para las realizaciones presentadas, la síntesis y el ensamblaje de las partes y los mecanismos básicos necesarios son, en muchos sentidos, más simples que las complejidades de la fabricación de un ordenador electrónico convencional o que la implementación de propuestas anteriores para la computación mecánica.

Disipación de energía

Como se indica, un sistema MLL completo puede construirse con nada más que eslabones y juntas rotatorias. Dado que, particularmente a escala molecular, hay muy poca pérdida de energía por la rotación alrededor de una junta rotatoria bien diseñada, se puede diseñar un sistema computacional completo que disipa muy poca energía. Paradigmas adicionales de diseño MLL (p. ej., par de torsión y equilibrio de masas para reducir o prevenir la radiación acústica) también se analizan en la presente memoria, y estos pueden ayudar a reducir aún más la disipación de energía. Además del diseño físico del sistema computacional, también las condiciones de funcionamiento pueden afectar la disipación de energía. Por ejemplo, si un sistema MLL funciona en un vacío, la aceleración y la desaceleración de los eslabones se producen de manera suave, y las fuerzas aplicadas son lo suficientemente pequeñas como para que la deformación de las partes básicas contribuya a que la disipación de energía sea insignificante, pudiendo la disipación de energía reducirse aún más.

El diseño de los mecanismos MLL y su interacción con el sistema de sincronización también pueden influir en la disipación de energía. Por ejemplo, los sistemas MLL pueden diseñarse de tal manera que, al utilizar adecuadamente las fases de reloj, no se aplica fuerza a los mecanismos que no son libres de moverse (p. ej., dicho sistema no intenta mover un mecanismo bloqueado sin desbloquearlo primero). Esta es la versión MLL de "conmutación seca", un término normalmente usado en el campo de los relés para indicar que los conmutadores no tienen tensión a través de ellos cuando cambian de estado, pero en la presente memoria se usará en el contexto de MLL. Téngase en cuenta que, si bien es un hallazgo novedoso e importante de MLL el hecho de que sistemas computacionales completos pueden diseñarse sin nada más que eslabones y juntas rotatorias, los sistemas MLL pueden incorporar o interactuar con componentes adicionales. Por ejemplo, en la presente memoria se describe cómo las levas y seguidores de leva son una forma de generar señales de reloj. Sin embargo, si bien las levas y seguidores de leva pueden diseñarse (como se explica en la presente memoria) para tener una disipación de energía mínima, dichos mecanismos son accesorios, y no efectivamente parte de MLL. Los motores u otras formas para alimentar el movimiento de los sistemas MLL son otro ejemplo de una función que puede acoplarse a un sistema MLL, pero que no se consideran parte de MLL, y lo mismo podría decirse, por ejemplo, de las interfaces de entrada/salida que hacen las veces de puente, p. ej., en MLL y sistemas electrónicos o sistemas mecánicos no NELL.

Cualquier sistema mecánico puede disipar una cantidad sustancial de energía si se ejecuta lo suficientemente rápido como para excitar las resonancias mecánicas internas. Para mantener la disipación de energía lo más baja posible, un diseño adecuado puede evitar que los modos de vibración de baja frecuencia se acoplen al reloj, y los modos de vibración restantes pueden calcularse y evitarse eligiendo una velocidad de operación lo suficientemente lenta como para evitar excitarlos, así como una forma de onda de sincronización que minimiza su excitación. En un

sistema mecánico a escala molecular, dichas frecuencias de resonancia pueden estar en el rango de gigahercios, y los límites que imponen a la velocidad de conmutación pueden, por lo tanto, ser correspondientemente altos.

La velocidad de conmutación de un sistema MLL, tal como en ordenadores electrónicos, se determina mediante uno o más relojes que producen señales de reloj. Si el espectro de frecuencia de una señal de reloj tiene un componente de su energía con frecuencias de resonancia iguales o superiores a las de los mecanismos a los que se conecta, entonces podría disiparse una fracción de la energía de reloj mayor de la necesaria.

En un sistema MLL, los cambios en una señal de reloj son preferiblemente graduales para no generar componentes de mayor frecuencia. Por ejemplo, los cambios graduales inherentes a una transición en forma de onda sinusoidal entre 0 y 1 (potencialmente con áreas planas en 0 y 1 entre transiciones para permitir una sincronización no perfecta de mecanismos entre diferentes fases de reloj) permiten que una señal de reloj evite colocar una tensión mayor de la necesaria sobre los mecanismos del sistema, ya que las partes aceleran y deceleran de manera más uniforme que si, p. ej., se usara una onda cuadrada.

Existen muchas formas de generar señales de reloj. Una forma de generar una señal de reloj que cambia gradualmente es utilizar una masa giratoria cuyo movimiento de rotación se convierte en movimiento lineal o casi lineal. Esto es, conceptualmente, el equivalente de un volante y manivela, y dicho dispositivo puede realizarse con solo eslabones y juntas rotatorias. Algunas realizaciones de los sistemas MLL pueden acoplarse a otros métodos para generar señales de reloj, tales como sistemas de resorte y masa, o levas y seguidores de leva, que se describen en la presente memoria.

Se analizaron varias fuentes posibles de disipación de energía, incluidos el desequilibrio térmico inducido por estrés, y la radiación acústica. Estos no fueron los principales factores limitantes en la frecuencia de funcionamiento, al menos para los sistemas ilustrativos analizados (p. ej., sistemas basados en diamante, a escala molecular). Las resonancias mecánicas y la inercia son los principales límites a la velocidad de conmutación para estos sistemas.

Si bien el equilibrio térmico resulta no ser un factor limitante para los sistemas ilustrativos analizados, en algunas situaciones podría serlo, y un objetivo cuando se busca minimizar la disipación de energía podría ser el de hacer funcionar los mecanismos en modo isotérmico. Por esta razón pueden ser deseables tiempos de equilibrio térmico cortos. Para lograr esto, las partes básicas del sistema se acoplan preferiblemente bien a uno o más depósitos térmicos. Por ejemplo, los eslabones se unen generalmente a una junta rotatoria que se une a un bloque de anclaje, o a juntas rotatorias que se unen a otros eslabones, que a su vez se unen a un bloque de anclaje. Si bien la longitud exacta de la trayectoria puede variar basada en la implementación, esto tiende a mantener corta la trayectoria desde cualquier eslabón hasta un bloque de anclaje, que puede servir como depósito térmico.

Téngase en cuenta que el diamante se utiliza como un material de bloque de anclaje ilustrativo (y también puede utilizarse para partes básicas), entre otras razones, debido a su alta rigidez (módulo de Young de aproximadamente 1000 GPa). El diamante también tiene una buena conducción de calor, que puede ser superior a 2000 W/mK en el diamante natural, y más alta en el diamante sin defectos e isotópicamente purificado (un principio que también se aplica a otros materiales). Se podrían utilizar muchos otros materiales, tanto para los bloques de anclaje como para las partes básicas, aunque sería preferible una alta rigidez por varias razones, incluida la elevación de la frecuencia de vibraciones de resonancia, y una buena conducción de calor sería preferible si se desea un equilibrio térmico rápido. Otros materiales ilustrativos incluyen Carbyne (módulo de Young de 32.100 GPa), diversos fullerenos (p. ej., los nanotubos de carbono pueden tener módulos de Young de más de 1000 GPa, conductividad térmica de 3180-3500 W/mK o superior), carburo de silicio (módulo de Young de 450 GPa) y silicio (módulo de Young de 130-185 GPa, conductividad térmica de 148 W/mK). Téngase en cuenta que estos valores son aproximados y generalmente representan valores medidos a 300 K (temperatura ambiente). Los valores pueden variar sustancialmente dependiendo de la estructura atómica, la pureza, la composición isotópica, el tamaño, la forma y la temperatura de un material. Por ejemplo, si bien la conductividad térmica del silicio es de 148 W/mK a 300 K, puede superar los 3000 W/mK a temperaturas de aproximadamente 20 K.

Además, téngase en cuenta que los sistemas MLL no necesitan estar compuestos de un solo tipo de material. Cada uno de los varios materiales presenta diferentes ventajas y desventajas, que incluyen no solo propiedades volumétricas tales como rigidez, conductividad térmica y expansión térmica, sino que, a escala molecular, la fuerza de los enlaces individuales puede ser importante, así como pueden serlo el tamaño exacto de varias partes básicas y su separación interatómica (p. ej., de modo que se engranen correctamente con otras partes básicas, entre otras preocupaciones). Dicho esto, los sistemas MLL pueden usar una variedad de materiales diferentes.

El tiempo estimado de equilibrio térmico de una realización ilustrativa a escala molecular que utiliza eslabones de diamante de aproximadamente 20 nm de longitud es de ~0,54 ps. Teniendo esto en cuenta, incluso unos pocos nanosegundos de equilibrio térmico hacen que la energía disipada debido al desequilibrio térmico sea esencialmente igual a 0. Por lo tanto, el tiempo de equilibrio térmico no es el factor limitante en el tiempo de conmutación para dicha realización.

En teoría, se puede llevar a cabo una operación reversible con una energía igual a 0, siempre y cuando las operaciones irreversibles den como resultado la disipación de $\ln(2)$ kBT de calor ($\sim 3 \times 10^{-21}$ J a temperatura ambiente) por bit borrado, independientemente de la eficiencia del hardware (límite de Landauer). Para reducir la disipación de energía de un programa que se ejecuta en un ordenador convencional (irreversible), los elementos

lógicos del hardware pueden rediseñarse para disipar menos energía durante el proceso computacional. Esto podría resultar en una mejora significativa de la eficiencia energética, ya que un ordenador convencional disipa mucho más de $\ln(2)$ kBT por bit borrado. De hecho, incluso cuando se ejecutan instrucciones que no borran ningún bit, un ordenador convencional disipa mucho más de $\ln(2)$ kBT por operación. Como consecuencia, es posible reducir la disipación de energía de un ordenador convencional sin prestar atención a la reversibilidad.

Sin embargo, si se mejora la eficiencia energética de un ordenador hasta el punto de que el límite de Landauer se vuelve significativo, la reversibilidad se vuelve importante, ya que permite que los cálculos se lleven a cabo bajo el límite de Landauer. En consecuencia, los mecanismos MLL están diseñados para permitir la reversibilidad, aunque tanto los sistemas computacionales reversibles como los irreversibles pueden implementarse usando MLL. Téngase en cuenta que la reversibilidad puede ocurrir a varios niveles. Por ejemplo, una compuerta de Fredkin individual es reversible. Sin embargo, la reversibilidad también se puede implementar a niveles más altos, tal como cuando se usa una cascada retráctil para borrar una serie de cálculos anteriores. Dichas técnicas son bien conocidas en la literatura, junto con apropiados esquemas de sincronización, tales como la sincronización de Bennett y la sincronización de Landauer.

Puertas lógicas convencionales

Los eslabones y las juntas rotatorias no solo sirven como partes básicas para mover los datos de un lugar a otro, sino que también constituyen la base para las puertas lógicas. Un hallazgo importante de MLL es que cualquier puerta lógica, reversible o irreversible, puede implementarse solo con eslabones y juntas rotatorias, fijadas a un bloque de anclaje para mantenerlas en su lugar (y que también puede servir como un disipador térmico).

Por ejemplo, la Figura 3 muestra un mecanismo que puede servir como una puerta AND y como una puerta NAND. El anclaje 301 y la corredera lineal 302 sirven como la primera entrada a la puerta, conectándose a la junta rotatoria 306. El anclaje 303 y la corredera lineal 304 sirven como la segunda entrada a la puerta, conectándose a la junta rotatoria 307. Las juntas rotatorias ancladas 305 y 309, más las juntas rotatorias no ancladas 306, 307, 308, 310 y 311 se conectan a través de los eslabones adecuados. Y la salida 310 de AND y la salida 311 de NAND proporcionan el uso de la puerta como una puerta AND o una puerta NAND. El funcionamiento de esta puerta es el siguiente. Si la corredera lineal 302 empuja la junta rotatoria 306 (una entrada de "1", mientras que ningún movimiento de la corredera lineal sería una entrada de 0) y la corredera lineal 304 empuja sobre la junta rotatoria 307, el efecto será el de impulsar hacia adelante la salida 310 de AND, produciendo una salida de "1". Si cualquiera de las entradas (o ambas) es 0, la salida 310 de AND termina en la misma posición en la que inició, produciendo una salida de "0". Esto reproduce la tabla de verdad prevista de una puerta AND.

Dado que una puerta NAND es una puerta AND con salida invertida, el mismo mecanismo puede usarse como una puerta NAND leyendo la salida 311 de NAND en lugar de la salida 310 de AND, suponiendo que, dado que la salida 311 de NAND se mueve en la dirección opuesta a la salida 310 de AND, ningún movimiento en la salida 311 de NAND representa una salida de "1" y el movimiento a la izquierda representa un "0". Por supuesto, para su uso solo como puerta AND, no es necesario que la salida NAND 311 esté presente. Y, para su uso solo como puerta NAND, la salida AND 310 puede ignorarse. Las dos se combinan con fines ilustrativos; no necesariamente se combinarían así en el uso real. Dado que NAND es conocida por ser una puerta universal (lo que significa que todas las demás puertas pueden crearse con la combinación apropiada de puertas NAND), este mecanismo por sí solo sería suficiente para crear cualquier lógica combinatoria. Sin embargo, puede ser más eficiente construir otros tipos de puertas directamente, en lugar de a través de la combinación de puertas NAND, y para demostrar otros tipos de puertas, que incluyen realizaciones alternativas de la puerta NAND, posteriormente se describen puertas lógicas adicionales.

La Figura 4 muestra una puerta NOR realizada solo con eslabones y juntas rotatorias. La entrada 1 comprende el anclaje deslizante lineal 401 y se conecta a través de una junta rotatoria al inversor 405. La entrada 2 comprende el anclaje deslizante lineal 403 y la corredera lineal 404 y se conecta a través de una junta rotatoria al inversor 406. Como en todas estas figuras, las correderas lineales están presentes como una comodidad esquemática o programática y deben considerarse como representativas de alguna conexión adecuada cuando estos mecanismos individuales se combinan en un conjunto de nivel superior. Los inversores 405 y 406 invierten una señal hacia la izquierda en una señal hacia la derecha y viceversa y se conectan a través de juntas rotatorias a la parte superior derecha del mecanismo 407 y a la parte inferior derecha del mecanismo 408, respectivamente. Debido a los inversores, cuando cualquiera de las entradas empuja hacia la derecha, el movimiento se invierte en un movimiento hacia la izquierda en la parte superior derecha del mecanismo 407 y la parte inferior derecha del mecanismo 408. La posición de la salida 409 replica la tabla de verdad prevista, con la posición ilustrada que representa un "1" y la posición donde la salida se mueve a la izquierda que representa un "0". Si bien son posibles otras implementaciones, esta puerta muestra la naturaleza modular de los mecanismos. Una puerta NOR es equivalente a una puerta AND con ambas entradas invertidas. La porción superior derecha del mecanismo 407 y la porción inferior derecha del mecanismo 408 muestran, por lo tanto, una implementación alternativa de una puerta AND, con un inversor conectado a cada entrada para crear en su lugar una puerta NOR. Quitar los inversores y conectar las entradas directamente a las ubicaciones apropiadas en la porción superior e inferior derecha del mecanismo daría como resultado una puerta AND. Además, como se muestra en la Figura 3, este mecanismo también podría servir como una puerta NAND al invertir la salida de la puerta AND. Finalmente, si los inversores se dejan en su lugar, pero la salida se invierte, la puerta NOR se convierte en una puerta OR.

Finalmente, la Figura 5 muestra una puerta XOR implementada utilizando solo eslabones y juntas rotatorias. La entrada 1 comprende una junta rotatoria 501 anclada y una corredera lineal 502, mientras que la entrada 2 comprende una junta rotatoria 504 anclada y una corredera lineal 503. La entrada 1 y la entrada 2 se acoplan a la salida 505 a través de una serie de eslabones, juntas rotatorias ancladas y juntas rotatorias no ancladas. El movimiento, o la falta del mismo, en la salida 505 replica la tabla de verdad prevista para XOR.

Lo anterior demuestra que cualquier puerta lógica puede implementarse directamente utilizando solo eslabones y juntas rotatorias. Téngase en cuenta que al transferir los datos de entrada junto con la salida prevista de una puerta lógica de modo que no se pierden datos durante el cálculo, las puertas lógicas que tradicionalmente se consideran irreversibles pueden hacerse reversibles. También existen puertas lógicas muy conocidas que son inherentemente reversibles, tales como la puerta de Toffoli y la puerta de Fredkin, que también se pueden implementar de muchas formas utilizando MLL.

Puertas lógicas reversibles

La Figura 6 muestra una puerta de Fredkin (también llamada puerta CSWAP), una puerta reversible universal muy conocida. Las tres entradas a la puerta 601, 602 y 603 se conectan, a través de una serie de eslabones, juntas rotatorias ancladas y juntas rotatorias no ancladas, a las salidas 604, 605 y 606. Puede ser interesante señalar que esta implementación particular de una puerta de Fredkin se compone de tres puertas XOR y una puerta AND, más algunas líneas de datos bifurcadas utilizadas para replicar datos de modo que puedan usarse en más de un lugar dentro de la puerta. Esto demuestra no solo un enrutamiento de datos más sofisticado respecto a las puertas anteriores, sino que la lógica reversible puede construirse a partir de la lógica irreversible. Una puerta de Fredkin no borra ningún dato y, por lo tanto, no necesita estar sujeta al límite de Landauer.

Teniendo en cuenta los ejemplos de puertas lógicas anteriores, resultará obvio que cualquier tipo de puerta lógica necesaria para implementar un sistema de computación completo de propósito general, reversible o irreversible, puede implementarse dentro de los paradigmas de diseño de MLL, utilizando solo eslabones y juntas rotatorias. Téngase en cuenta que cada uno de los ejemplos de puerta lógica anteriores son mecanismos coplanarios. Esto significa que funcionan en uno o más planos paralelos, y el movimiento se produce paralelo al plano de la imagen. Una de las ventajas de los diseños coplanarios es que son fáciles de representar en papel, para proporcionar al lector una comprensión intuitiva de cómo funcionan dichos mecanismos. Esta no es la única forma de implementar puertas lógicas, o cualquier mecanismo MLL, y en la presente memoria también se analizan mecanismos que se mueven en más de un plano. Téngase en cuenta también que en los mecanismos coplanarios, las líneas ocultas o de puntos generalmente no se utilizan para mostrar cuáles eslabones están detrás de cuáles otros eslabones. Esto se debe a que en gran medida no tiene importancia. En la mayoría de los casos, un eslabón dado podría estar encima o debajo de algún otro eslabón, y la función del mecanismo no se vería afectada, con sujeción a consideraciones tales como que los eslabones no choquen entre sí durante el movimiento. Tal vez se desee considerar también cuestiones tales como la disposición de los eslabones de una manera que minimice la distancia a un disipador de calor, o maximice la resistencia o rigidez del mecanismo, pero estos diseños ilustrativos están destinados a ser didácticos, no para proporcionar una implementación óptima. Las implementaciones optimizadas podrían diferir según los requisitos de un sistema computacional particular, incluidos los tipos de cálculos que se realizarán, la velocidad computacional deseada, el tamaño o la masa deseada del sistema, los materiales a partir de los cuales se fabrican los mecanismos y el entorno operativo (p. ej., temperaturas de funcionamiento).

Cerraduras

Ya se han descrito varias formas en las que pueden interactuar múltiples eslabones o líneas de datos. Por ejemplo, pueden compartir datos vinculando sus movimientos físicos entre sí alrededor de una junta rotatoria común. Y los eslabones o líneas de datos pueden proporcionar entrada/salida para una puerta lógica (por no mencionar su uso dentro de una puerta lógica). Sin embargo, métodos adicionales de interacción pueden ser útiles para implementar un sistema de computación completo.

Otra forma en que múltiples eslabones o líneas pueden interactuar es a través de un mecanismo que haga que los eslabones interfieran con los movimientos de los demás. Es decir, la posición de un primer eslabón puede permitir o evitar que uno u otros más eslabones se muevan, y viceversa. Por ejemplo, considérese un mecanismo de dos entradas, donde cada entrada puede ser 0 o 1. El diseño puede ser tal que cuando ambas entradas son 0, una de las entradas podría convertirse en 1, pero cuando una de las entradas es 1, la otra se bloquea en su lugar y, por lo tanto, debe permanecer en 0. En este ejemplo, más de una entrada no puede convertirse en 1 al mismo tiempo, si bien son posibles otros diseños. Este mecanismo se denomina cerradura. Es común que una cerradura tenga entradas y salidas, al igual que una puerta lógica. Por ejemplo, una cerradura de 2 entradas tiene 2 entradas, y puede tener 0, 1 o 2 salidas. Cada línea de entrada a la cerradura puede continuar como una línea de salida, o puede terminar en la cerradura.

Uno de los usos de una cerradura es crear un punto de anclaje condicional. Como ya se ha explicado, una junta rotatoria puede anclarse o no anclarse, frecuentemente dependiendo de si la junta rotatoria se fija a un bloque de anclaje. Sin embargo, fijar una junta rotatoria a un bloque de anclaje no es la única manera de hacerla inmóvil. Más bien, una junta rotatoria puede conectarse a uno o más eslabones que, debido a la configuración del uno o más eslabones (ya sea que esta configuración es permanente o transitoria), no permite el movimiento de la junta rotatoria. Por ejemplo, considérese un triángulo formado por tres eslabones. Cada eslabón se fija a los otros dos

eslabones mediante juntas rotatorias en cada extremo. Si dos de estas juntas rotatorias también se conectan a un bloque de anclaje, incluso si la tercera junta rotatoria no se conecta a un bloque de anclaje, esta se ancla efectivamente, ya que todo el triángulo es rígido. Ninguno de los eslabones del triángulo puede moverse el uno con respecto al otro, o con respecto al bloque de anclaje. En este ejemplo simple, suponiendo que no sea posible cambiar la configuración del eslabón, la tercera junta rotatoria se ancla efectivamente. Existen situaciones en las que es útil tener una junta rotatoria a veces anclada y a veces no anclada. Las cerraduras permiten esto: El lado de la cerradura que se bloquea no puede moverse, por lo que mientras esté bloqueado, puede actuar efectivamente como un punto de anclaje. La utilidad de los puntos de anclaje condicionales se explicará más adelante. Otro aspecto útil de algunas realizaciones de cerraduras es que, por ejemplo, una cerradura binaria con dos entradas puede tener tres estados: (0,0), también denominado “en blanco”, (0,1) y (1,0). El estado en blanco puede ser útil para guardar el estado y permitir la computación reversible, como se puede ver en la presente memoria en la descripción de cómo se puede implementar un registro de desplazamiento ilustrativo.

Como ocurre con todas las realizaciones de MLL, hay varias formas de implementar cerraduras utilizando sólo eslabones y juntas rotatorias. La Figura 7 y la Figura 8 representan una cerradura coplanaria de dos entradas en dos estados diferentes. La Figura 7 muestra la posición de la cerradura donde ambas entradas son 0, mientras que la Figura 8 muestra la posición de la cerradura cuando una de las entradas es 1. La entrada superior 701 y la entrada inferior 702 se conectan a través de juntas rotatorias a las mitades superior e inferior de la cerradura, respectivamente. Cada mitad de la cerradura comprende un eslabonamiento de 4 barras, que comprende los eslabones 703, 705 y 712 en la mitad superior, y los eslabones 704, 706 y 713 en la mitad inferior. Además, cuatro eslabones diagonales 707, 708, 710 y 711, sujetan un eslabón adicional 709, que se conecta a los dos eslabonamientos de 4 barras a través de juntas rotatorias no ancladas. El funcionamiento del mecanismo es el siguiente: Cuando una de las entradas 701 o 702 se mueve de 0 a 1, el eslabonamiento de 4 barras respectivo se mueve. El movimiento del eslabonamiento de 4 barras, a través de los eslabones 707 y 710 para la mitad superior, o los eslabones 708 y 711 para la mitad inferior, provoca la rotación del eslabón 709. El eslabón 709, teniendo la misma longitud que los eslabones 703, 704, 712 y 713, y estando inicialmente en el mismo ángulo, permite que cualquiera de las entradas asuma un valor de 1 al girar a través del mismo arco que debe seguir el eslabonamiento de 4 barras cuando es movido por una entrada.

Sin embargo, una vez que una entrada ha movido el eslabonamiento de 4 barras superior o inferior, junto con el eslabón 709, el otro eslabonamiento de 4 barras (y, por lo tanto, su entrada/salida asociada) ya no está libre de moverse. La razón es que el eslabón 709 ahora no es paralelo, dependiendo de qué entrada se estableció en 1, a los eslabones 703 y 712, o a los eslabones 704 y 713. Debido a esto, la rotación del eslabón 709 no seguirá la del segundo eslabonamiento de 4 barras, en caso de que intente moverse. En esencia, uno de los eslabones (eslabón 705 para la parte superior, si aún no se ha movido, o el eslabón 706 para la parte inferior, si aún no se ha movido) intentará moverse a través de dos arcos diferentes a la vez, provocando el bloqueo del mecanismo. Esta es esencialmente una versión coplanaria de juntas rotatorias que no son coaxiales (descritas en otra parte en la presente memoria), pero en lugar de que los ejes de juntas rotatorias cambien (lo que sucede, pero estos ejes nunca fueron coaxiales en el sentido literal para empezar), el punto aquí es que el arco a través del cual se moverían los eslabones conectados cambia. Una vez que una de las entradas se establece en 1, el único movimiento permitido es volver a establecer esa entrada en 0 de modo que cualquiera de los lados (pero no ambos simultáneamente) son nuevamente libres de moverse a la posición “1”.

El diseño de la cerradura de la Figura 7 tiene la propiedad de que se bloquea rápidamente y se desbloquea lentamente. Por ejemplo, prácticamente cualquier movimiento de una de las entradas bloquea la otra entrada. Y, una vez que se ha establecido una entrada en 1, bloqueando el mecanismo, esa entrada debe regresar esencialmente a 0 antes de que la cerradura se desbloquee. Puede ser deseable diseñar cerraduras que tengan propiedades de bloqueo más graduales, y esto puede tener ventajas que incluyen cambios más suaves en la entropía (dando como resultado una reducción de la disipación de energía), una fuerza máxima reducida en los mecanismos a una dada velocidad de conmutación, y un tiempo reducido entre ciclos de bloqueo/desbloqueo, ya que existe menos preocupación de que una entrada deba poder establecerse en casi exactamente 0 antes de que la otra entrada pueda comenzar a moverse. La inclusión de resortes en las conexiones a una cerradura también puede ayudar en el funcionamiento de una cerradura, ya que el mecanismo puede entonces accionarse según se desee incluso en presencia de pequeños errores de posición que, de otro modo, bloquearían un mecanismo que se bloquea casi instantáneamente cuando no está exactamente en la posición desbloqueada (es decir, en “0”). Otro método para lograr esto es reemplazar el eslabón 709 con un resorte de la misma longitud (o añadir un resorte y acortar el eslabón) que tenga una constante de resorte adecuadamente elegida. Si el eslabón 709 es, o incorpora, un resorte muy rígido, la cerradura solo permitirá pequeños errores de posición. Si el eslabón 709 es, o incorpora, un resorte más flexible, la cerradura permitirá errores de posición más grandes.

La Figura 9 y la Figura 10 representan una cerradura donde, debido al cambio gradual del par de torsión a medida que el mecanismo pasa de desbloqueado a bloqueado, la acción de bloqueo es más gradual. La Figura 9 muestra el bloqueo cuando las entradas 901 y 902 están en 0, mientras que la Figura 10 muestra el estado del bloqueo después de que la entrada 901 se ha establecido en 1 mientras la entrada 902 sigue estando en 0. Las entradas 901 y 902 se conectan al resto del mecanismo a través de juntas rotatorias no ancladas. Téngase en cuenta que el establecimiento de una entrada en 1 da como resultado que la otra entrada retroceda ligeramente en este diseño. El sistema en general puede diseñarse para permitir esto, o el movimiento hacia atrás podría mantenerse en el interior del mecanismo, tal como utilizando resortes que absorban dicho movimiento en lugar de transmitirlos directamente a otros eslabones.

Al estar hechos de las mismas partes básicas, todos los mecanismos MLL tienden a compartir problemas similares. Los conceptos de cambios de entropía repentinos frente a los graduales, limitación de las fuerzas máximas y diseño de mecanismos para permitir una latencia reducida entre las fases de reloj pueden aplicarse a cualquier mecanismo MLL, no solo a las cerraduras.

Mecanismos no coplanarios

Muchos de los mecanismos en la presente memoria son de diseño coplanario. Si bien se da preferencia a los diseños coplanarios para mayor claridad de presentación, los mecanismos MLL no necesitan ser coplanarios. Cualquier mecanismo MLL puede implementarse de una manera que no sea coplanaria. Por ejemplo, la Figura 11 representa una cerradura, construida con eslabones y juntas rotatorias, que no es coplanaria. Más bien, como se explicará posteriormente, las juntas rotatorias permiten que los eslabones se muevan perpendiculares, en lugar de paralelos, a la cara del bloque de anclaje.

En la Figura 11 y las vistas posteriores del mismo mecanismo, se hará referencia al eslabón 1101 como Link1, al eslabón 1102 como Link2, al eslabón 1103 como Link3, al espacio 1104 como OpenJoint4, al espacio 1105 como OpenJoint5, al espacio 1106 como OpenJoint6, al espacio 1107 como OpenJoint7, a la junta rotatoria 1108 como Joint1, a la junta rotatoria 1109 como Joint2, a la junta rotatoria 1110 como Joint3, a la junta rotatoria 1111 como Joint4, y al bloque de anclaje 1112 como Anchor Block. El bloque de anclaje proporciona puntos de anclaje para las juntas rotatorias Joint1 y Joint4, que se conectan a Link1 y Link2, respectivamente. Link1 se conecta a Link2 mediante Joint2, y Link3 se conecta a Link2 a través de Joint3. Todas las juntas y Link1, Link2 y Link3 se muestran en la posición desbloqueada.

En la posición desbloqueada, que puede denominarse “(0,0)”, el eje de Joint3 se alinea con el eje de Joint1, y el eje de Joint2 se alinea con el eje de Joint4. Por lo tanto, Joint1 y Joint3 pueden denominarse coaxiales, al igual que Joint2 y Joint4. Si se girara Link1 o Link3, una de sus juntas rotatorias se movería fuera de su plano actual y, por lo tanto, dependiendo de qué eslabón se giró, algunas de las juntas ya no serían coaxiales entre sí (una condición denominada “no coaxial”). Los conceptos de coaxial y no coaxial son importantes ya que, en esta realización, estas condiciones son las que definen la posición bloqueada frente a la desbloqueada. La razón de esto es que en la posición desbloqueada, Link1 y Link3 tienen cada uno un eje alrededor del cual pueden girar. Para Link1, se trata del eje definido por Joint1 y Joint3 cuando son coaxiales. Para Link3, se trata del eje definido por Joint2 y Joint4 cuando son coaxiales. Cuando estos conjuntos de juntas no están en la posición coaxial, la falta de alineación entre los dos ejes impide el giro, ya que un objeto rígido con un grado de libertad no puede girar simultáneamente alrededor de dos ejes diferentes. Como resultado, cuando Joint1 y Joint3 no son coaxiales, o Joint2 y Joint4 son no coaxiales, la cerradura se bloquea y el único movimiento permitido es volver a la posición desbloqueada.

Téngase en cuenta que técnicamente, prácticamente cualquier cantidad de giro de Link1 o Link3 crearía una condición bloqueada. Sin embargo, con fines de explicación, las figuras posteriores muestran aproximadamente 30 grados de rotación. Esto es arbitrario, y se podría utilizar cualquier cantidad de giro que permita que el sistema actúe de manera fiable (al igual que cualquier otro ángulo, a diferencia de un ángulo perfectamente perpendicular a la cara del bloque de anclaje). Análogamente a la cerradura coplanaria, si Link2 se sustituyera por un resorte de longitud similar, la tolerancia de la cerradura para errores posicionales podría aumentarse en sus entradas, en la medida que se considere adecuada. Teniendo en cuenta esta explicación, resultará obvio que si Link1 o Link3 giraran una cantidad adecuada, cualquier eslabón que no hubiera girado estaría impedido de hacerlo hasta que el eslabón girado regresara a la posición desbloqueada.

Para lograr este giro, OpenJoint4 y OpenJoint6 son puntos de conexión donde otros eslabones podrían conectarse a Link3, y OpenJoint5 y OpenJoint7 son puntos de conexión donde otros eslabones podrían conectarse a Link1. Estos otros eslabones pueden servir como entradas para la cerradura. Link1 y Link3 tienen cada uno un par de conexiones (OpenJoint5 y OpenJoint7, y OpenJoint4 y OpenJoint6, respectivamente) para no permitir cuatro entradas (aunque eso es posible, esa no es la intención de este diseño particular), sino más bien permitir que una línea de entrada continúe más allá de la cerradura si lo desea. Por ejemplo, OpenJoint5 puede considerarse como una continuación de OpenJoint7 (o viceversa) y OpenJoint4 puede considerarse como una continuación de OpenJoint6 (o viceversa).

La Figura 12 muestra una vista superior del mismo mecanismo de la Figura 11, siendo visibles en esta vista solo el eslabón 1101 y el bloque de anclaje 1112.

La Figura 13 muestra el mismo mecanismo de la Figura 11, pero en una posición bloqueada que podría denominarse “(1,0)”. En este estado, 1101 ha rotado, a través de las juntas rotatorias 1108 y 1110, haciendo que las juntas rotatorias 1109 y 1111 no sean coaxiales. Debido a que 1109 y 1111 no son coaxiales, 1103 ya no es libre de rotar, de ahí el estado bloqueado. La rotación de 1101 se lograría mediante otros eslabones (no representados) conectados a 1105 y/o 1107.

La Figura 14 muestra una vista superior del estado del mecanismo en la Figura 13. En esta vista superior, se puede ver que 1101 ha girado aproximadamente 30 grados en sentido antihorario. 1102 no puede verse en esta vista, pero giraría con 1101 en este caso, revelando 1103 por debajo de él. Téngase en cuenta que la dirección de rotación es arbitraria. Tanto en el sentido horario como en el sentido antihorario tendrían el mismo efecto de bloquear la cerradura. Esto también es cierto para 1103.

La Figura 15 muestra el mismo mecanismo de la Figura 13, pero en una posición bloqueada debido a la rotación de 1103 en lugar de 1102. Esta posición podría llamarse "(0,1)". En este estado, 1103 ha rotado, a través de las juntas rotatorias 1109 y 1111, haciendo que las juntas rotatorias 1108 y 1110 no sean coaxiales, bloqueando así 1101. La rotación de 1103 sería provocada por otros eslabones (no mostrados) conectados a una o más de las OpenJoints, 1104 y 1106, de 1103.

La Figura 16 muestra una vista superior del estado del mecanismo en la Figura 15. En esta vista superior se puede ver que 1103 ha girado aproximadamente 30 grados en el sentido horario, mientras que 1101 todavía está en su posición original. Como con 1101, la dirección de rotación es arbitraria. Ya sea en el sentido horario o en el sentido antihorario permitiría un funcionamiento adecuado de la cerradura, y se podrían usar uno o ambos.

Teniendo en cuenta estos ejemplos y los principios de MLL, muchos otros diseños (para cerraduras y todos los demás mecanismos MLL) resultarán obvios. Las implementaciones específicas que funcionan de manera más eficiente pueden depender del caso, y las realizaciones ilustrativas en la presente memoria no se proporcionan como ejemplos de mecanismos optimizados, sino más bien para demostrar cómo se pueden crear todos los elementos necesarios para un sistema computacional generalizable utilizando solo eslabones y juntas rotatorias, y que incluso dentro de las restricciones de solo utilizar eslabones y juntas rotatorias, se encuentran disponibles muchas opciones lógicas y mecánicas diferentes, que incluyen prácticamente cualquier tipo de puertas lógicas, reversibles e irreversibles, y mecanismos que funcionan en gran medida en dos dimensiones ("coplanarios"), o tres dimensiones (no coplanarios), completos con un robusto enrutamiento de datos, en cualquier ángulo que se desee.

Balanzas

La fuerza y el movimiento pueden transmitirse desde un extremo de un eslabón al otro extremo utilizando una junta rotatoria alrededor de la cual gira el eslabón. Dicho mecanismo se denominará "balanza", ya que con frecuencia la entrada está en el centro de un eslabón, y un lado se mueve "arriba" o "abajo", conceptualmente similar a una clásica balanza de platillos. Por supuesto, el movimiento exacto dependerá de las fuerzas aplicadas, el diseño exacto del mecanismo y el estado del sistema.

Una balanza simple se representa en dos estados diferentes en la Figura 17 (que muestra una entrada de 0, estando retraída la corredera lineal de entrada 1701) y la Figura 18 (que muestra el mismo mecanismo con una entrada de 1, estando extendida la corredera lineal de entrada 1701). En estas figuras, la entrada 1701 se conecta al eslabón 1702 mediante la junta rotatoria 1703. La junta rotatoria superior 1704 y la junta rotatoria inferior 1705 se conectan a través de eslabones a la salida superior 1706 y la salida inferior 1707, respectivamente. La junta rotatoria superior 1704 se ancla en estas representaciones, evitando que la salida superior 1706 se mueva, mientras que la junta rotatoria inferior 1705 no se ancla, permitiendo que la salida inferior 1707 se mueva si la entrada 1701 se mueve.

La Figura 19 representa lo que ocurriría si la junta rotatoria superior 1704 y la junta rotatoria inferior 1705 se invirtieran (es decir, si la junta rotatoria superior 1704 se desanclara y la junta rotatoria inferior 1705 se anclara), dada una entrada de 1. El movimiento de salida ocurriría en la salida superior 1706 en lugar de la salida inferior 1707. Una de las propiedades interesantes de las balanzas es que pueden diseñarse para conservar la suma de sus entradas. En el ejemplo anterior, si la entrada es 0, la salida es 0. Si la entrada es 1, la salida es 1. Esto también sería válido para una línea simple, pero se pueden construir balanzas complejas con múltiples entradas que aun así sumen sus salidas.

Otra ventaja de las balanzas es que pueden enrutar datos de manera diferente dependiendo de otra entrada. Otra entrada, por ejemplo, puede controlar el estado de las cerraduras conectadas a una balanza. Las cerraduras actúan como anclajes condicionales, enrutando datos por una línea u otra dependiendo del estado de las cerraduras y permitiendo que una balanza funcione como un conmutador o "puerta de conmutación". Por ejemplo, una sola balanza con anclajes condicionales podría ponerse en cualquiera de las configuraciones mostradas en la Figura 17, Figura 18 y Figura 19, ya que los puntos de anclaje pueden cambiarse (este concepto se demuestra en las figuras posteriores).

La Figura 20 y la Figura 21 ilustran una forma en la que se pueden usar balanzas con múltiples entradas para conservar la suma de las entradas y para enrutar datos. Se representan dos estados del mismo mecanismo, que se forman al conectar entre sí dos balanzas de 2 entradas (una "balanza doble binaria"). Las entradas 2001 y 2002 se conectan al eslabón 2005 mediante juntas rotatorias. El eslabón 2005 se conecta al eslabón 2007 a través de una junta rotatoria. El eslabón 2007 se conecta al eslabón 2006 a través de una junta rotatoria. El eslabón 2006 se conecta a las salidas 2003 y 2004 a través de sus respectivas juntas rotatorias. La longitud fija del eslabón 2007 hace que la suma de las entradas se conserve. Dado que el eslabón 2007 no puede cambiar de longitud, si la entrada 2001 o 2002 se mueve, un correspondiente movimiento debe tener lugar en la salida 2003 o 2004. La Figura 20 muestra el estado del mecanismo cuando la entrada 2001 es 1, y la entrada 2002 es 0. La Figura 21 muestra el estado del mecanismo cuando la entrada 2001 y la entrada 2002 son ambas 1. Téngase en cuenta que el mecanismo en estas figuras (como suele ser el caso debido a la complejidad de sistemas más completos y a la necesidad de ilustraciones claras de los mecanismos básicos subyacentes de MLL) no se une a otros mecanismos como sí lo haría en un sistema MLL real. En este caso particular, sin restricciones adicionales este mecanismo no será fiable. Por ejemplo, cuando se mueve desde una entrada de (0,0) a (1,0), la suma de las salidas debe ser 1, ya que la suma de las entradas es 1. Sin embargo, no hay forma de indicar si las salidas serán (0,1) o (1,0), o

incluso algo similar (0,5,0,5). En un sistema real, una forma de resolver este problema es con cerraduras. Al bloquear condicionalmente una de las salidas, la otra salida se ve obligada a moverse de manera predecible.

Puertas de conmutación

Como se ha descrito anteriormente, las balanzas, junto con las cerraduras, son una forma en la que puede implementarse una puerta de conmutación. La Figura 22 muestra una puerta de conmutación con una entrada 2201 superior, una entrada 2202 inferior y una entrada 2203 central. La entrada intermedia se conecta, a través de una balanza, a la salida superior 2204 y la salida inferior 2205. Las entradas superior e inferior controlan si la entrada intermedia se encamina a la salida superior o a la salida inferior. Por ejemplo, si la entrada superior 2201 se establece en 1, entonces la cerradura superior a la que se conecta la entrada superior 2201 se bloquea. Dado que eso significa que la línea que va a la salida superior 2204 no puede moverse, cuando se proporciona una entrada de 1 en la entrada intermedia 2203, la balanza a la que está conectada la entrada intermedia 2203 debe mover la línea que conduce a la salida inferior 2205. Las entradas superior e inferior generalmente nunca serían 1 al mismo tiempo, por lo que podrían condensarse realmente en una entrada que controla ambas cerraduras, p. ej., una entrada de 0 que bloquea la cerradura superior, y una entrada de 1 que bloquea la cerradura inferior, o viceversa.

Las balanzas dobles binarias acopladas a las cerraduras también se pueden utilizar como puertas de conmutación. Dada una balanza doble binaria, una entrada se bloquea permanentemente, mientras que una entrada se desbloquea permanentemente y se conecta a una entrada (típicamente un reloj). A continuación, se puede usar una sola línea para conmutar dos cerraduras complementarias que están conectadas a las dos entradas restantes de la balanza doble. En esencia, la entrada de reloj se encamina a través de la balanza doble a una o la otra "entrada" mediante la única línea que controla las dos cerraduras complementarias. Téngase en cuenta que se pueden usar puertas de conmutación (y otros mecanismos de MLL que tienen estados bloqueados) incluso cuando se desea la conmutación seca. En el caso de una puerta de conmutación como la de la Figura 22, la fuerza de reloj se aplica a través de una balanza que conecta dos cerraduras. Dado que el sistema puede diseñarse de modo que ambas cerraduras nunca se bloqueen simultáneamente cuando se aplica la fuerza de reloj, un lado siempre es libre de moverse. Por lo tanto, la fuerza de reloj no se dirige a un mecanismo inmóvil, sino más bien a un mecanismo que puede condicionalmente siempre moverse en una dirección u otra.

Puertas lógicas utilizando cerraduras y balanzas

Una propiedad interesante de las cerraduras y balanzas es que pueden utilizarse para crear todas las puertas lógicas tradicionales (además de otros mecanismos), reversibles e irreversibles. Antes de describir una forma en la que esto se puede realizar, facilitará la comprensión de la puerta lógica basada en cerradura ilustrativa el análisis de un método alternativo para proporcionar una entrada a un mecanismo (en este caso, una cerradura). Es típico pensar en una entrada binaria como una conexión única a una línea. Por ejemplo, en las puertas lógicas descritas anteriormente, tales como AND, NAND, NOR y XOR, cada una de estas puertas lógicas tomó dos entradas, frecuentemente representadas como dos actuadores lineales, pero que en un sistema MLL real serían, p. ej., dos conexiones a líneas de datos. La puerta de Fredkin toma tres entradas, y así tenía tres ubicaciones donde podrían conectarse líneas de datos. Cada una de las entradas a estas puertas lógicas ilustrativas era binaria, es decir, el mecanismo se diseñó de tal manera que una posición representaba 0, mientras que una segunda posición representaba 1. Aunque son posibles otras implementaciones, frecuentemente una entrada de 0 se ha representado como que ningún movimiento se produce en esa entrada, mientras que una entrada de 1 se representó por algún movimiento hacia adelante o hacia la derecha.

Sin embargo, existen otras formas de representar la entrada. Por ejemplo, en lugar de una entrada binaria usando una conexión que proporciona uno de dos valores posibles (0 o 1), una entrada binaria podría consistir en dos conexiones, una que representa 0 y la otra que representa 1. En este escenario, una de las conexiones a una entrada siempre se movería: La línea 0 se movería si la entrada fuera 0, y la línea 1 se movería si la entrada fuera 1. Esto contrasta con el hecho de que 0 anteriormente estaba representado por la ausencia de movimiento de una entrada. Esta estrategia de usar dos líneas por entrada binaria es útil con cerraduras porque permite que cualquier valor, 0 o 1, cree un estado bloqueado. Una entrada de 0 bloquea un lado de la cerradura, mientras que una entrada de 1 bloquea el otro. Una ventaja de tener tanto 0 como 1 dando como resultado un estado bloqueado en diferentes lados es que esto permite que una cerradura actúe como dos puntos de anclaje condicionales diferentes. Esto puede utilizarse, por ejemplo, para controlar qué lado de una balanza se mueve cuando se introduce la entrada en la balanza. El siguiente ejemplo muestra un mecanismo que ilustra cómo esta propiedad de las cerraduras se puede combinar con balanzas para crear puertas lógicas.

La Figura 23 representa una forma en la que una puerta NAND puede construirse usando balanzas y eslabones. La entrada de reloj 2301 se conecta a la balanza 2302, que a su vez se conecta a la balanza 2303, que a su vez se conecta a la balanza 2304. A través de una serie de cerraduras y líneas, la entrada de reloj se dirige a las balanzas 2305 y 2306, y finalmente da como resultado el movimiento de la salida superior 2312 o la salida inferior 2311. Las entradas 2307 a 2310 proporcionan entradas a la puerta, con cuatro líneas de entrada utilizadas para representar dos entradas binarias, como se describió anteriormente. Específicamente, la entrada 2307 se indicará como "A0" (lo que significa que está asociada con la entrada "A", y se moverá si la entrada "A" es 0), la entrada 2308 como "B0", la entrada 2309 como "A1" y la entrada 2310 como "B1". Téngase en cuenta que para las entradas 2307 a 2310 hay dos entradas, cada una con la misma etiqueta. Esto se debe a que los mismos datos de entrada se usan en dos lugares diferentes dentro de la puerta. En realidad, esto no requeriría dos entradas separadas para cada una, sino más bien una entrada para cada una podría bifurcarse usando eslabones

simples en forma de varilla, o conectarse a un único eslabón que proporcione múltiples puntos de conexión. La representación en la figura 23 se eligió por razones de claridad, no porque deba ser exactamente el modo como realmente se implementa el mecanismo (que generalmente es válido para todos los mecanismos descritos en la presente memoria). El mecanismo funciona de la siguiente manera: Si se acciona, las entradas 2307 a 2310 mueven el lado de la puerta a la que están conectadas y bloquean la puerta. En otras palabras, si la entrada (A, B) es (0,1), las líneas A0 se moverán, y las líneas B1 se moverán. Dado que A no es 1, las líneas A1 no se moverán, y dado que B no es 0, las líneas B0 no se moverán. Obviamente, se permite la entrada (0,0), (0,1), (1,0) o (1,1). Las entradas establecen un patrón de qué puertas se bloquean y cuáles no. Este patrón a su vez determina qué lado de cada balanza es libre de moverse. La entrada de reloj activa entonces las balanzas, con el resultado final que ya sea la salida inferior 2311, que representa (A NAND B)0, se moverá, o la salida superior 2312, que representa (A NAND B)1, se moverá. La salida resultante genera la tabla de verdad NAND:

Entradas				Salidas	
A1	A0	B1	B0	(A NAND B)1	(A NAND B)0
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	1

Como ya se ha mencionado, NAND es una puerta universal. Por lo tanto, de este ejemplo se deduce que se podría utilizar un sistema de cerraduras y balanzas para diseñar cualquier otra puerta lógica deseada, reversible o irreversible, utilizando combinaciones de puertas NAND. Sin embargo, esta puede no ser la manera más eficiente de implementar cualquier lógica deseada, y pueden usarse mecanismos similares basados en cerraduras y balanzas para implementar cualquier otra puerta lógica directamente, incluidas AND, OR, NOR, XOR, XNOR, NOT, CNOT, Toffoli y otras.

Ya se ha descrito una implementación de una puerta de Fredkin. Las cerraduras y balanzas también se pueden usar para construir una puerta de Fredkin. Una puerta de Fredkin tiene tres entradas y tres salidas. Las tres entradas se llamarán A, B y C, y las tres salidas X, Y y Z. La entrada A siempre se conecta a la salida X. Si la entrada A es 0, entonces la entrada B se conecta a la salida Y y la entrada C se conecta a la salida Z. Si la entrada A es 1, entonces la entrada B se conecta a la salida Z y la entrada C se conecta a la salida Y. Como se señaló anteriormente, las puertas de Fredkin son puertas universales, lo que significa que cualquier operación lógica o aritmética puede calcularse con solo puertas de Fredkin. Esto no quiere decir que un sistema de computación MLL práctico deba componerse únicamente de puertas de Fredkin, ya que esta no necesariamente sería la configuración más eficiente para muchas tareas de cálculo. Como resultará obvio a partir de las enseñanzas en la presente memoria, muchos otros tipos de puertas pueden implementarse usando MLL. Las puertas de Fredkin se usan como una realización ilustrativa porque son universales y reversibles.

La Figura 24 representa una puerta de Fredkin elaborada usando cerraduras y balanzas. Debido a la complejidad del mecanismo, se usa una notación simplificada donde las juntas rotatorias ancladas no se muestran explícitamente, pero se supone que están en los extremos no conectados de eslabones apropiados. La entrada o señal de reloj (actuador no mostrado, como con todas las entradas a este mecanismo) se uniría a la junta rotatoria 2401. La entrada para la entrada A1, A0, B1, B0, C1 y C0 se uniría a las juntas rotatorias 2402, 2403, 2404, 2405, 2406 y 2407, respectivamente. Las entradas B1, B0, C1 y C0 también se conectarían a las juntas rotatorias 2408, 2409, 2410 y 2411, respectivamente. La señal y entradas de reloj se conectan a través de una serie de eslabones y cerraduras, y para algunas salidas, balanzas, a la salida X1 2412, la salida X0 2413, la salida Y1 2414, la salida Y0 2415, la salida Z1 2416 y la salida Z0 2417. Téngase en cuenta que las salidas X1 y X0 no se muestran en el lado derecho junto a las otras salidas para reducir la complejidad de la figura. En realidad, obviamente podrían dirigirse a cualquier ubicación deseada. Téngase en cuenta que los eslabones 2418 y 2419 son parte de eslabonamientos de 4 barras, no de balanzas, lo que obliga a estos eslabones a permanecer verticales cuando se mueven. Los triángulos negros 2420 y 2421 ilustran eslabonamientos rígidos (no se usa una línea recta para evitar una representación con excesivas líneas que se cruzan entre sí, y esta representación es solo esquemática, los mecanismos reales podrían implementarse de muchas formas).

El estado en blanco se representa en la Figura 24. Conceptualmente, a partir de este estado, las entradas A, B y C se establecen durante una fase de reloj. Durante una fase de reloj posterior, la señal de reloj conectada a la junta rotatoria 2401 se establece en "1", lo que provoca el movimiento de las diversas balanzas dentro del mecanismo, dando como resultado que las salidas X, Y y Z se establezcan según corresponda. Si bien un enfoque sencillo para construir un sistema sería el de usar puertas de Fredkin en todas partes, y usar la sincronización de Landauer trifásica, otros enfoques son factibles. Como resultará obvio a partir de los diversos esquemas de sincronización conocidos, puede haber fases de reloj adicionales y, al usar la sincronización de Bennet, el número de señales de reloj dependerá del número de etapas que se desee permitir en una cascada retráctil.

Registros de desplazamiento

Los registros de desplazamiento se pueden usar como base para implementar la lógica secuencial en un sistema computacional. Por ejemplo, dos números que se sumarán, sustraerán, aplicarán AND o OR se almacenan en dos registros

de desplazamiento y se sincronizan en una unidad aritmética y lógica que consiste en una puñada de puertas, enviándose el resultado a la entrada de un tercer registro de desplazamiento llamado el acumulador. En circuitos digitales reversibles, un registro de desplazamiento puede definirse como una serie de “celdas”, teniendo cada celda tres estados estables: 0, 1 y en blanco (b), que se pueden usar para almacenar información de estado. Las celdas se sincronizan mediante relojes sucesivos. La salida de cada celda se conecta a la entrada de la siguiente celda en la cadena. Los datos almacenados en la cadena se desplazan en una posición después de cada ciclo de reloj; los datos (0,1, o b) en la entrada se desplazan hacia adentro mientras que los datos al final de la matriz se desplazan hacia afuera. Los registros de desplazamiento sincronizados binarios se pueden implementar usando solo los relojes y las juntas rotatorias conectadas por eslabones (creando cerraduras y balanzas) descritos anteriormente. Los registros de desplazamiento son simples, pero cuando se combinan con la lógica combinatoria apropiada, contienen todos los elementos fundamentales requeridos para un sistema computacional.

Se puede construir un registro de desplazamiento combinando cerraduras y balanzas, y suponiendo la presencia de un sistema de reloj, de modo que cada celda (que podría verse como un flip-flop, y que también puede considerarse como una memoria intermedia y puede usarse para sincronizar fases de reloj de diferentes procesos al introducir retardos de fase de reloj) del registro de desplazamiento esté relacionada con su vecina en virtud del hecho de depender de una fase de reloj anterior o posterior, según corresponda. Esto permite copiar y desplazar datos a través del registro de desplazamiento, en lugar de establecer de manera determinista el contenido de todo el registro de desplazamiento simultáneamente.

La Figura 25, la Figura 26 y la Figura 27 representan una celda única de un registro de desplazamiento, en tres estados diferentes. En estas figuras, la entrada 0 2501 se conecta a través de una junta rotatoria a un lado de la cerradura 2505. La entrada 1 2502 se conecta a través de una junta rotatoria a un lado de la cerradura 2506. La señal de reloj 2503 (aunque se esquematiza de manera diferente para proporcionar un mecanismo que es más completo cuando es independiente, en un sistema real sería una conexión con el sistema de reloj) se une a la balanza 2504. Las cerraduras 2505 y 2506 determinan cuál de las salidas 2507 o 2508 se mueve cuando la señal de reloj se convierte en 1. La cerradura que contiene las salidas 2507 y 2508 puede considerarse como la cerradura de salida para toda la celda, mientras que las cerraduras 2505 y 2506 son cerraduras del área de retención. La importancia de este concepto quedará claro al conectar múltiples celdas en serie.

La Figura 25 representa la celda en su estado en blanco, antes de que se haya proporcionado cualquier entrada, y mientras la señal de reloj es baja o está en 0. La Figura 26 representa la celda después de que la entrada 2501 se ha establecido en 1, pero antes de que la señal de reloj se haya movido a alta o 1. Esto da como resultado el bloqueo de la cerradura 2505.

La Figura 27 representa el mecanismo del estado anterior una vez que la señal de reloj se ha movido a alta. A medida que la señal de reloj 2503 empuja la balanza 2504, debido a que la cerradura 2505 está bloqueada, solo un lado de la balanza 2504 es libre de moverse. Por lo tanto, la señal de reloj que se mueve a alta se transmite a través de la cerradura 2506 y a la salida 2508. Téngase en cuenta que los movimientos entre estados tales como los ilustrados en la Figura 25, Figura 26 y Figura 27 no tienen lugar simultáneamente sino que están regidos por las señales de reloj y las entradas de datos (que pueden vincularse a las señales de reloj). Este comportamiento secuencial es lo que permite el funcionamiento adecuado de esta celda o buffer (también análogo a un pestillo en computación electrónica). Dicho comportamiento es fácil de realizar y muy conocido en implementaciones eléctricas, pero más complicado en una implementación mecánica.

La Figura 28a, que comprende la mitad izquierda, y la Figura 28b, que comprende la mitad derecha, representan colectivamente un registro de desplazamiento de dos celdas para ilustrar cómo se conectarían dos celdas y para explicar cómo los datos se moverían de una celda a la siguiente. En la Figura 28a, la celda 1 2801, y en la Figura 28b, la celda 2 2802, son cada una equivalentes al mecanismo representado en la Figura 25. En la Figura 28a, la celda 1 2801 tiene una conexión a una señal de reloj a través del eslabón 2803 (representado como un eslabón parcial para indicar la conexión a un sistema de reloj que no se muestra), y en la Figura 28b, la celda 2 2802 tiene una conexión a una señal de reloj a través del eslabón 2806. Los eslabones 2804 y 2805 conectan la celda 1 2801 y la celda 2 2802.

Al igual que en la Figura 25, la Figura 26 y la Figura 27, se supone que está presente una señal de reloj multifase, y los eslabones 2803 y 2806, y las entradas de datos asociadas con cada celda funcionarían preferentemente en diferentes fases de reloj, requiriendo al menos un reloj trifásico para este diseño particular. Ya se ha descrito el funcionamiento de una celda única, pero demostrar cómo la celda 1 2801 pasa los datos a la celda 2 2802 puede ser instructivo. La secuencia de eventos es la siguiente: (1) en la fase de reloj 1, el reloj para la celda 1 2801 ya estaba en 0, y las entradas de datos se establecen para la celda 1 2801. Ya sea la cerradura superior o la inferior de la celda 1 2801 se bloquea, dependiendo de qué entrada se estableció en 1; (2) en la fase de reloj 2, la señal de reloj para la celda 1 2801 se establece en 1. Esto da como resultado el desbloqueo del lado de la balanza presente en la celda 1 2801 que se mueve, lo que a su vez mueve ya sea el eslabón 2804 o el eslabón 2805. Esto bloquea una de las cerraduras del área de retención de la celda 2 2802, copiando los datos de la celda 1 2801 en el área de retención de la celda 2 2802. Téngase en cuenta que la cerradura de salida de la celda 2 2802 aún no se ha movido; (3) en la fase de reloj 3, la señal de reloj para la celda 2 2802 se establece en 1. Esto copia los datos de las cerraduras del área de retención en la cerradura de salida de la celda 2 2802. En detalle, una de las cerraduras del área de retención de la celda 2 2802 ya estaba bloqueada, por lo que cuando la señal de reloj para la celda 2 2802 cambia de 0 a 1, solo la línea desbloqueada podría moverse. Cuando esta línea desbloqueada se movió, se bloqueó la cerradura de salida de la celda 2 2802. También se bloqueó la segunda de las dos cerraduras del área de retención de la celda 2 2802; y (4) la señal de reloj para la celda 1 se establece en 0. Esto elimina los datos de la celda 1 2801 desde la celda 2 2802 desbloqueando solo la cerradura del área de retención de la celda

2 2802 que se bloqueó inicialmente cuando el reloj de la celda 1 2801 se estableció en 1, ya que la otra cerradura acababa de ser bloqueada por la señal de reloj a la celda 2 2802. Este ciclo se repite a continuación a medida que nuevos datos se introducen en la celda 1. En la etapa 2 anterior, se observa que la cerradura de salida de la celda 2 2802 aún no se ha movido. Esto permite que estas celdas de registro de desplazamiento ilustrativas almacenen datos anteriores, mientras que los mecanismos tales como algunas de las puertas lógicas descritas en la presente memoria tienen su estado completamente determinado por las entradas de datos actuales. Esto se debe a que una celda puede contener no solo una entrada previa (que termina siendo desplazada hacia su cerradura de salida durante la fase de reloj 3), sino también la entrada actual, que se almacena en las cerraduras del área de retención.

A partir de esta descripción resultará evidente que si se desea reversibilidad en el nivel de la celda del registro de desplazamiento (u otro mecanismo), todo lo que se debe hacer es ejecutar las fases de reloj en el orden opuesto. Si se desea una cascada retráctil, entonces se puede usar un esquema como el de sincronización de Bennett, junto con el diseño de hardware apropiado (p. ej., la capacidad de almacenar bits 'basura' de modo que no se pierda información, lo que permite que el cálculo sea reversible para tantos niveles de profundidad como se desee). En el ejemplo actual, el registro de desplazamiento tiene solo 2 celdas de largo, solo se pueden almacenar 2 números. En un sistema real, dicho registro de desplazamiento puede ser arbitrariamente largo. Además, si bien esta implementación particular es un diseño de entrada en serie/salida en serie, resultará obvio dado este ejemplo que MLL se puede usar para realizar cualquier otro tipo de registro de desplazamiento deseado, tal como entrada en paralelo/salida en paralelo, entrada en serie/salida en paralelo, y otros.

Cancelación del impulso

Puede ser útil realizar cálculos sin alterar ni el centro de masa ni el momento de inercia de un grupo de estructuras computacionales, de modo que las fuerzas que estos cambios provocarían no se acoplen a todo el sistema, contribuyendo así potencialmente a la disipación de energía. Esto se puede lograr utilizando conjuntos de estructuras cuyos movimientos cancelen los cambios en el centro de masa o el par de torsión alrededor de cualquier eje (un "grupo de cancelación"). Dichas técnicas pueden aplicarse a cualquier estructura, tales como eslabones, cerraduras, puertas lógicas, balanzas, relojes y estructuras agregadas más grandes. Por ejemplo, considérese un eslabón o línea que se usa para transmitir datos desde un lugar a otro. Dicha estructura puede reemplazarse por cuatro estructuras paralelas, agrupadas conceptualmente como dos pares. Cada elemento de un par se mueve en la dirección opuesta, cancela los cambios en el centro de masa y el impulso lineal. Sin embargo, cada par aún podría crear un par de torsión. Por lo tanto, la dirección del movimiento de cada eslabón se invierte desde el primer par al segundo par, lo que da como resultado una cancelación del par de torsión. Dado este tipo de disposición, ninguna fuerza neta se acopla al dispositivo general y, por lo tanto, dichos grupos de cancelación pueden usarse para transmitir datos reduciendo al mismo tiempo la energía acoplada al resto de la estructura.

La Figura 29 ilustra este concepto usando los grupos 2901 y 2902, cada uno de los cuales contiene dos miembros, 2903 y 2904, y 2905 y 2906, respectivamente. Dentro de un grupo, cada miembro se mueve en la dirección opuesta con respecto al otro miembro (si bien cada miembro no se conecta a los otros en el diagrama, en un sistema real los movimientos se sincronizarían, p. ej., mediante señales de reloj). Por ejemplo, como se representa, el miembro 2903 se ha movido a la derecha, mientras que el miembro 2904 se ha movido a la izquierda. Las aceleraciones que tienen lugar durante estos movimientos generarán fuerzas sobre la estructura de soporte subyacente (el bloque de anclaje, no mostrado). Dado que los miembros 2903 y 2904 aceleran en direcciones opuestas, los componentes lineales de su impulso se cancelarán. Sin embargo, en esta disposición seguirán generando un par de torsión neto en el bloque de anclaje. La adición del segundo par de miembros 2902 que contiene los miembros 2905 y 2906, que también se mueven en direcciones opuestas dentro del par, pero generan un par de torsión que es opuesto al par de torsión del grupo 2901, permite una cancelación completa.

Obviamente, muchos otros diseños podrían usarse ya sea para cancelar el impulso, o para reducir la necesidad de hacerlo en primer lugar (p. ej., reduciendo la masa o reduciendo los radios a los centros de rotaciones). Dado esto, la cancelación de impulso no se limita a ninguna disposición particular. Tampoco los grupos de cancelación se limitan a un número específico de miembros. Podrían usarse números impares, tal como donde los miembros de un grupo de cancelación no tienen las mismas masas o impulso. Por ejemplo, dos miembros podrían usarse para cancelar un otro miembro que genera dos veces el impulso. Y la cancelación de impulso no necesita ser completa. Además, las fuerzas a lo largo de cualquier eje pueden direccionarse de manera similar. Por ejemplo, en diseños reales, es posible que también sea necesario cancelar fuerzas que provocan un par de torsión a lo largo del eje Z, que se define para este ejemplo como perpendicular al plano de la figura. La complejidad y el aumento en masa de una cancelación completa pueden superar los beneficios, y la cantidad apropiada de cancelación (si corresponde), y qué componentes de fuerza cancelar, si corresponde, variarán de un caso a otro.

Relojes

En un sistema MLL, un sistema de reloj sincroniza los mecanismos, y también proporciona fuerza para accionar los mecanismos. Es muy conocido en el campo de las ciencias de la computación que pueden usarse sistemas computacionales con diferentes números de señales (o fases) de reloj. Se requieren al menos 2 fases, pero 3 fases pueden ser ventajosas, y también se pueden usar números más altos. Un sistema de reloj MLL podría consistir en uno o más relojes que crean una pluralidad de señales de reloj. Estas señales podrían tomar la forma de movimiento recíproco transmitido a través de mecanismos, tales como a través de líneas, o el uso de tramas rígidas (que son en realidad simplemente eslabones de forma especializada, por ejemplo, una trama rígida podría conectarse a un

reloj en una única ubicación y, a continuación, ramificarse, potencialmente en múltiples direcciones o dimensiones) para conectarse a muchas puertas u otros mecanismos), soportados por eslabones de soporte según sea necesario. El número óptimo de mecanismos conectados a un único reloj o señal de reloj será específico de la implementación, dependiendo de factores como la masa que se acciona, la rigidez del sistema y la velocidad de conmutación.

Alternativamente, las señales de reloj podrían generarse mediante múltiples relojes locales, tales como osciladores o masas giratorias, con comunicación entre los relojes según se requiera para mantenerlos sincronizados.

Las señales de reloj podrían generarse de varias maneras. Por ejemplo, se pueden usar masas giratorias, osciladores armónicos, o levas y seguidores de leva, creando movimiento periódico en eslabones donde, por ejemplo, una posición puede representar "0" y otra posición puede representar "1". Una masa giratoria, que es esencialmente un volante, puede servir como un oscilador simple. Los volantes de inercia, acoplados a eslabones mediante juntas rotatorias, podrían usarse para accionar cada señal de reloj hacia adelante y hacia atrás y no requieren partes más allá de eslabones y juntas rotatorias. Un volante de inercia podría mantenerse en movimiento constante mediante algún tipo de fuente de energía o motor, que repone la energía perdida en los mecanismos disipativos del sistema. Una discusión sobre exactamente cómo se podría implementar dicha fuente de energía o motor está más allá de los límites de la invención. Resulta obvio a partir de la literatura, que contiene un trabajo sustancial tanto sobre motores a macroescala como sobre motores a escala molecular, que incluyen biomotores (p. ej., ATPasas, flagelos) y motores sintéticos, que hay muchas formas de implementar dichos motores y muchas formas de alimentar dichos motores, incluidos los campos químicos, luminosos, de corriente continua y eléctricos externos.

Otros diseños de relojes introducen partes más allá de eslabones y juntas rotatorias, por lo que no se encuentran técnicamente en la definición de MLL. Sin embargo, dado que el uso de sistemas de sincronización alternativos conectados a un sistema MLL puede resultar útil, se describe cómo se pueden diseñar dichas implementaciones de reloj alternativas para una disipación de energía mínima. Además, ya que un reloj único puede accionar muchos elementos lógicos, incluso si el propio reloj fuera algo disipativo, en general, el cálculo aún podría ser bastante eficiente.

Un sistema de sincronización alternativo consistiría en usar osciladores armónicos simples, preferiblemente con un factor Q elevado. El uso de osciladores armónicos simples tiene la ventaja de que se usaría una única frecuencia de sincronización, y que la frecuencia de sincronización sería proporcionada por un mecanismo muy simple. Usando dicho oscilador, los componentes se diseñarían preferiblemente para usar señales de reloj de tipo sinusoidal (incluidas señales con transiciones de tipo sinusoidal entre 0 y 1 con áreas planas intermedias para fines de temporización), y se diseñarían de tal manera que no generaran sobretonos de frecuencia significativamente más alta durante el funcionamiento (como, por ejemplo, si una parte móvil entra en colisión con otra parte móvil). Alternativamente, podría usarse una suma de osciladores simples, la suma que se aproxima a la señal de reloj deseada. El uso de un número suficiente de osciladores podría, en principio, aproximar la señal de reloj deseada con la máxima precisión deseada, a expensas de partes adicionales. Una forma de implementar un oscilador armónico es con un resorte (en el que se incluye una flexión u otras estructuras de propósito similar), que podría estar fabricado de cualquier material con las propiedades y constante de resorte apropiadas, incluyendo los mismos materiales que los eslabones.

Las levas y los seguidores de leva son otra forma de generar una señal de reloj. Se puede usar una leva y seguidor de leva para generar una señal de reloj muy suave, como se describe posteriormente. También se puede usar una leva para generar una señal de reloj con una forma de onda esencialmente arbitraria. Podría hacerse una leva, por ejemplo, a partir de un eslabón rotatorio soportado por juntas rotatorias en cada extremo. El eslabón forma así un eje que puede usarse como árbol de levas. La leva se fijaría al árbol de levas (o el árbol de levas podría ser en realidad la leva, suponiendo que tiene la forma de sección transversal apropiada). Puede construirse un seguidor de leva, por ejemplo, usando una rueda conectada a dos juntas rotatorias, conectadas a un brazo de palanca. La rotación del árbol de levas haría rotar la leva. La rueda de seguidor de leva se montaría hacia arriba y hacia abajo sobre la leva, haciendo que el brazo de palanca subiera y bajara junto con ella. El brazo de palanca sería un eslabón en un eslabonamiento adecuado. Se podrían usar muchas otras geometrías y posiciones relativas para la leva y el seguidor de leva, incluidos diseños donde el seguidor de leva rodea la leva, o viceversa, tal como con un rotor y un estator excéntricos, así como variaciones en los tipos de movimiento que realiza la leva, tal como diseños donde la leva simplemente se balancea hacia adelante y hacia atrás, o se mueve de una manera que está ella misma bajo control programático, así como combinaciones de las variaciones anteriores y evidentes.

Si bien puede no ser obvio cómo se pueden hacer curvas suaves a nivel molecular, dado que los ángulos y las distancias están cuantificados por la naturaleza de los enlaces químicos, este problema puede superarse. Por ejemplo, en el diamante, las dislocaciones de Lomer enterradas se podrían usar para crear curvas suaves sobre la superficie de una leva Lonsdaleite (diamante hexagonal). De manera similar, podrían lograrse cambios graduales con el diamante y otros materiales, usando cambios en los patrones de enlace, la incorporación de elementos de radios atómicos variables, usando tensión para desplazar ligeramente un átomo o átomos, o usando estructuras naturalmente curvas, tales como los nanotubos. Usando estas estrategias, una implementación molecular de las levas y los seguidores de leva (y de hecho, cualquier parte de dicho sistema) podría realizarse a tolerancias precisas casi arbitrariamente, incluso a distancias por debajo de un único diámetro atómico.

El uso de una masa giratoria para generar señales de reloj solo requiere juntas rotatorias y eslabones, las partes básicas de los sistemas MLL. Si se usaran una leva y un seguidor de leva, las juntas rotatorias que conectan el brazo de palanca del seguidor de leva a la rueda, y las que permiten que la leva gire, ya se han descrito nuevamente. Sin embargo, en un sistema

basado en levas, hay un contacto giratorio entre la leva y las superficies de rueda de seguidor de leva, una situación que no se presenta cuando se consideran las partes básicas de MLL. Si bien esto puede parecer un mecanismo que crea una fricción de deslizamiento no deseada, no es necesariamente así. Las dos superficies no tienen que deslizarse una sobre otra, sino que giran sincrónicamente. El análisis indica que, especialmente en el caso de una implementación a escala molecular y atómicamente precisa (o casi), la disipación de energía de dicho mecanismo sería muy baja.

En dicho mecanismo a escala molecular, la muy ligera distorsión en la forma de la rueda y la muy ligera variación en la fuerza de atracción (van der Waals) entre la superficie y la rueda podrían provocar una muy ligera generación de fonones. Vistas en el marco de referencia del seguidor de leva, la rueda y la superficie serían estáticas, salvo por el desplazamiento a una frecuencia muy alta de las estructuras cristalinas dentro de ellas. Como consecuencia, no debería haber generación de fonones de baja frecuencia. Y la inercia y las incertidumbres posicionales causadas por el ruido térmico impedirán que el mecanismo pueda reproducir los componentes de frecuencia más alta en la señal de la leva, incluso en ausencia de un filtro de paso bajo en la salida (que podría usarse si se desea, y podría implementarse, p. ej., como un simple dispositivo de resorte y masa).

Además, podrían usarse diversos métodos de cancelación para minimizar el componente de señal de alta frecuencia que está codificado en la superficie de la leva. Esto puede realizarse, por ejemplo, usando una pluralidad de ruedas de seguidor de leva que leen una pluralidad de pistas en la superficie de leva, estando cada pista escalonada una cierta distancia. Al unir cada rueda de seguidor de leva al seguidor de leva, se sumarían o promediarían efectivamente sus salidas, cancelando al menos parte de la señal de ruido de alta frecuencia. Se podría usar cualquier número de pistas y ruedas de seguidor de leva, con cualquier forma deseada para cada pista (p. ej., podrían codificarse diferentes señales de cancelación en cada pista), dando como resultado una precisión arbitraria de la señal agregada. Otro método para reducir el ruido de alta frecuencia sería el de girar el eje cristalino del material del que está hecha la leva, y realizar una rotación correspondiente de la estructura cristalina de la rueda que se engrana con ellos. Al elegir de manera adecuada la rotación cristalina y ancho de la leva y seguidor de leva, otras señales de alta frecuencia pueden eliminarse debido al cambio en la sincronización y el espaciado atómico cuando la leva entra en contacto con la rueda del seguidor de leva. Otro método más para reducir la transmisión de señales de alta frecuencia es reducir la rigidez del acoplamiento de la leva y el seguidor de leva al resto del sistema. Por ejemplo, reducir la constante de resorte del brazo del seguidor de leva, o reducir la rigidez de las uniones en las que se monta el seguidor de leva, ayudaría a filtrar señales de alta frecuencia.

Teniendo en cuenta estos ejemplos, resultará obvio que estas no son las únicas formas de reducir los componentes de alta frecuencia. Hay muchas maneras de garantizar que las partes en contacto giratorio no creen ni transmitan señales de alta frecuencia, y el uso de partes atómicamente precisas permite en particular minimizar dichas señales. A medida que el seguidor de leva sube y baja sobre la superficie de leva curva, siguiendo la señal de reloj codificada en esa superficie, someterá la superficie de la leva a fuerzas inerciales. Cada aceleración o desaceleración del seguidor de leva creará una fuerza correspondiente en la superficie de la leva. Estas fuerzas periódicas crearán fonones a la frecuencia del reloj. Esta fuente de disipación de energía se puede cancelar si dos seguidores de leva siguen dos levas, codificando las dos levas señales iguales pero opuestas. Y, dado que la frecuencia de reloj es arbitraria, esta frecuencia puede reducirse hasta que la disipación de energía causada por el acoplamiento de los componentes de alta frecuencia de la señal de reloj a los modos de vibración mecánica se encuentre bajo los niveles deseados. Téngase en cuenta que el mecanismo de seguidor de leva descrito puede ejercer una fuerza relativamente fuerte cuando la leva está empujando el seguidor de leva. Sin embargo, durante el movimiento en la dirección opuesta, la fuerza está limitada por la fuerza de Van der Waals entre la leva y la rueda. Esto puede rectificarse, si es necesario, por ejemplo, usando dos seguidores de leva y dos levas (con las señales codificadas giradas adecuadamente entre sí), donde los seguidores de leva están en lados opuestos de sus respectivas levas. El primer seguidor de leva puede ejercer una fuerte fuerza en una dirección, mientras que el segundo seguidor de leva puede ejercer una fuerte fuerza en la dirección opuesta.

Análisis ilustrativo del tiempo de conmutación

Las ecuaciones constitutivas básicas del movimiento newtoniano simple y los supuestos sobre el tamaño y la resistencia física de los eslabones pueden aplicarse a un análisis del tiempo de conmutación, masa, fuerza y frecuencia de resonancia para una implementación a escala molecular de los mecanismos MLL. Para proporcionar un ejemplo concreto, se deben hacer varios supuestos, todos los cuales podrían variar en gran medida dependiendo de la implementación exacta, pero el rendimiento exacto de un sistema dado no es el punto, sino que el objetivo es hacer una estimación de una posible velocidad de funcionamiento de un sistema de tamaño molecular ilustrativo. Se supone que los eslabones tienen ~20 nm de longitud y aproximadamente de 0,5 nm a 0,7 nm de diámetro. Se supone que los eslabones están hechos de diamante o material similar, y se pueden arriostrar para aumentar su rigidez (p. ej., una viga con arriostramiento triangular, en lugar de solo una viga recta). Se supone que la diferencia posicional entre “0” y “1” es ~2 nm. Se supone que las juntas rotatorias son similares a las mostradas en la Figura 1, y se supone que el sistema funciona a temperatura ambiente. Estos supuestos permiten calcular la rigidez del eslabón y la junta rotatoria. Para determinar la frecuencia de resonancia, debe determinarse la masa.

La masa de un mecanismo típico puede variar ampliamente. Incluso usando un tipo de eslabón dado, la masa será bastante diferente dependiendo de si el mecanismo es un eslabón único de 4 barras, una cerradura, una balanza, una puerta lógica, etc., y de las implementaciones exactas de dichas estructuras. Para utilizar cifras redondas, la masa móvil de un eslabón puede ser de aproximadamente 8×10^{-23} kg, mientras que la masa móvil de un mecanismo hecho de varios

eslabones podría ser del orden de 10^{-21} kg. Usando estos supuestos, la frecuencia de resonancia para un mecanismo a escala molecular ilustrativo puede ser de aproximadamente 13 GHz. Una señal de reloj de onda cuadrada conduciría a una disipación de energía sustancialmente más alta que la necesaria. Por lo tanto, se supone que la forma de onda del reloj se genera como una onda sinusoidal, convolucionada con una gaussiana para reducir los componentes de alta frecuencia no deseados, u optimizada usando la teoría de sistemas lineales estándar para minimizar la generación de resonancias no deseadas. Además, por razones de moderación, el reloj puede funcionar a una frecuencia muy por debajo de la frecuencia de resonancia de 13 GHz calculada. Dependiendo de varias suposiciones, tales como cuánta disipación de energía es aceptable y con cuánto margen de error, esto da como resultado tiempos de conmutación en el intervalo de 1 ns a 10 ns. Obviamente, esto es solo a modo de ejemplo. Las estructuras más grandes funcionarían probablemente a velocidades más lentas, mientras que estructuras más pequeñas, estructuras más rígidas, diseños que mueven distancias más cortas entre “0” y “1”, temperaturas de funcionamiento más bajas, o relajación de algunos de los parámetros de diseño conservadores asumidos, daría como resultado tiempos de conmutación más rápidos.

Resumen de MLL

Se ha demostrado que MLL es capaz de crear mecanismos que incluyen líneas, puertas lógicas, cerraduras, balanzas, puertas de conmutación y registros de desplazamiento, utilizando solo juntas rotatorias y eslabones. MLL proporciona cualquier lógica combinatoria usando varias combinaciones de puertas lógicas que, solas (p. ej., puertas NAND o Fredkin) o en conjunto, son universales. La lógica secuencial y, por lo tanto, la memoria, pueden proporcionarse mediante flip-flop o celdas, que pueden combinarse en registros de desplazamiento.

Teniendo en cuenta la disponibilidad de la lógica combinatoria y la lógica secuencial, resultará obvio que puede construirse un sistema computacional completo usando MLL. Por ejemplo, la arquitectura de Von Neumann, una conocida arquitectura Turing completa, requiere tres componentes principales: Una unidad de control, una unidad lógica aritmética y una memoria. Usando la lógica combinatoria y flip-flop, se puede crear una máquina de estado finito que puede usarse como unidad de control. La lógica combinatoria puede usarse para crear una unidad lógica aritmética. Y, se pueden usar flip-flop para crear memoria. Todo lo que se necesita para un sistema computacional completo. Por supuesto, dicho sistema no necesita basarse en la arquitectura de Von Neumann; esto es simplemente un ejemplo para ilustrar el hecho de que todos los componentes necesarios de un sistema Turing completo pueden proporcionarse usando MLL. Dependiendo de los mecanismos exactos utilizados y del esquema de sincronización empleado, un sistema computacional basado en MLL puede ser irreversible, reversible o una combinación de los dos. La capacidad de crear mecanismos de computación mecánica y sistemas computacionales completos, usando solo eslabones y juntas rotatorias, puede proporcionar ventajas que incluyen reducción de fricción (y, por lo tanto, del consumo de energía y la generación de calor residual), simplificación del diseño y la fabricación de dispositivos, y robustez del dispositivo (p. ej., funcionamiento a temperaturas más extremas que lo permitido por muchos otros sistemas computacionales conocidos, dado que la lógica mecánica podría funcionar hasta cerca del punto de fusión de sus partes constituyentes, mientras que la computación electrónica sufre de problemas de banda prohibida a temperaturas extremas).

Lógica de flexión mecánica

Las flexiones pueden tomar el lugar de las juntas rotatorias utilizadas en MLL, dando como resultado la Lógica de flexión mecánica (“MFL”). Con la sustitución de juntas rotatorias por flexiones, todos los mecanismos MLL tienen mecanismos de MFL análogos. Por ejemplo, la Figura 30 muestra la versión MFL de la cerradura MLL representada en la Figura 7. Los extremos de eslabón 3001 y 3002 de los eslabones 3003 y 3004, respectivamente, son un lugar donde podrían conectarse mecanismos de entrada. Los extremos de eslabón anclados 3007 y 3008 de los eslabones 3003 y 3004 actúan de manera análoga a las juntas rotatorias ancladas. Téngase en cuenta que no hay juntas rotatorias reales presentes en la versión MFL de una cerradura. Más bien, las flexiones, ilustradas por los recortes semicirculares 3005 y 3006, proporcionan puntos flexibles entre varias partes de la estructura. Estas flexiones permiten que la fuerza, que puede introducirse en los extremos 3001 o 3002 de eslabones, se transmita a través de eslabones triangulares 3010 o 3011, respectivamente, y en los extremos 3012 o 3013 de eslabón (que pueden considerarse como salidas), respectivamente. El eslabón 3009 cumple el mismo propósito que el eslabón 709 en la cerradura MLL coplanaria de la Figura 7. Todo el mecanismo de la Figura 30 puede realizarse (aunque no es necesario que así sea) de una única pieza de material, donde los diferentes eslabones son monolíticos, pero lógicamente separables porque están delimitados por flexiones.

En general, el movimiento y la función de las cerraduras MFL y MLL son completamente análogos, pero los cambios en el ángulo relativo entre eslabones en MFL se facilitan mediante flexiones en lugar de juntas rotatorias. Si bien se usan cerraduras para demostrar la analogía entre MFL y MLL, será evidente que pueden realizarse las mismas analogías entre cualquier mecanismo y, por lo tanto, al reemplazarse las juntas rotatorias con flexiones, se puede realizar un sistema Turing completo usando MFL. Por supuesto, las flexiones requieren materiales adecuados, que pueden diferir de los de los eslabones, y la geometría de las flexiones no necesariamente tiene que ser solo la que se representa en la Figura 30. Las flexiones son conocidas en las artes mecánicas, y los diseños y materiales adecuados podrían adaptarse para casi cualquier grado de movimiento, tamaño, temperatura de funcionamiento u otros parámetros.

Lógica de cableado mecánico

Otro método para implementar mecanismos y sistemas de computación que son análogos a MLL (y, por lo tanto, también a MFL) es el de reemplazar eslabones y juntas rotatorias con cables, poleas y manillas. Este paradigma de diseño se denominará Lógica de cableado mecánico ("MCL"). Con respecto a las partes básicas, o primitivas, los cables de MCL son análogos a los eslabones MLL, y las poleas MCL son análogas a las juntas rotatorias MLL. Las manillas son una primitiva adicional que no tienen un homólogo directo en MLL o MFL. Las manillas se usan para ayudar en la interacción de cables, por ejemplo, para crear cerraduras, y en ese sentido, ayudan en la construcción de mecanismos con funciones lógicas análogas, incluso si la parte en sí no tiene un análogo directo. Teniendo en cuenta las enseñanzas en la presente memoria, resultará obvio que al aplicar fuerza a un cable, el movimiento puede transmitirse por el cable y a otros mecanismos según se desee (de ahí su analogía con los eslabones). De manera similar, resultará evidente que las poleas se pueden usar, entre otros fines, para permitir que los cables se doblen de manera que el movimiento pueda dirigirse en cualquier dirección deseada (de ahí su analogía con las juntas rotatorias).

Las primitivas MCL se pueden usar para crear, entre otras, estructuras, balanzas y cerraduras. Si bien las implementaciones MCL de balanzas y cerraduras pueden parecer diferentes a sus homólogas en MLL, vistas desde una perspectiva de "caja negra", las balanzas y cerraduras de MCL pueden implementarse para ser lógicamente equivalentes a los mecanismos respectivos en MLL. Dicho esto, MCL también proporciona sistemas Turing completos.

Pistas y canales

Al igual que las juntas rotatorias de MLL, las poleas de MCL pueden anclarse o no anclarse. Sin embargo, en MLL los eslabones son rígidos y esto ayuda a restringir el movimiento de las juntas rotatorias no ancladas. En MCL, los cables no son rígidos, por lo que las restricciones geométricas adecuadas deben proporcionarse de una manera diferente. Una forma de hacer esto sería mantener la tensión en los cables apropiados (p. ej., cables de reloj) de modo que las poleas conectadas a dichas líneas no puedan moverse a menos que, en este ejemplo, las líneas de reloj se muevan, en cuyo caso el movimiento de la polea se limita a la trayectoria que definen los cables de reloj. Otra forma de abordar este problema sería montar poleas en eslabones donde fuera necesaria dicha restricción (aunque entonces se requeriría otra primitiva, y dado que esto desdibuja la distinción entre MLL y MCL, dicha realización no se analiza más adelante). Otra forma más es el uso de canales, pistas u otros medios de guía en el bloque de anclaje. En virtud de la fijación de manera deslizante a los medios de guía, el movimiento de poleas no ancladas se restringe apropiadamente.

La Figura 31 y la Figura 32 muestran una vista superior y una vista lateral, respectivamente, de una polea que puede deslizarse en un canal. El bloque de anclaje 3101 contiene el canal 3104. La polea 3102 es monolítica con, o conectada a (de manera fija o rotatoria), el eje 3103. El eje 3103 se conecta a sí mismo y la polea 3102 al canal 3104 de manera deslizante. El cable de accionamiento 3105 se fija al eje 3103 y permite el movimiento de la polea en el canal (p. ej., accionar usando una línea de reloj). Téngase en cuenta que esto es solo una forma de accionar y guiar el movimiento de polea y de fijar una polea a una pista, canal u otros medios de guía. Muchos otros diseños resultarían obvios, tales como una polea con un eje que se extiende a través del bloque de anclaje con una parte inferior expandida que sobresale de modo que no pueda salir del canal, un canal y un eje biselados (p. ej., similar a una junta de cola de milano de perfil) que podría lograr el mismo objetivo, o la adición de otra estructura de eje en la parte superior de la polea, junto con otro bloque de anclaje, sujetando la polea entre los dos.

Otra forma de proporcionar medios de guía consistiría en montar raíles en el bloque de anclaje, fijándose la polea a los raíles mediante uno cualquiera de los muchos medios conocidos. El punto no es la implementación mecánica exacta, sino más bien proporcionar algunos medios de guía, preferiblemente con baja fricción, teniendo en cuenta la flexibilidad de los cables; Se podría usar cualquiera de los muchos medios de guía conocidos.

Comprendiendo ahora cómo se puede restringir el movimiento de la polea sin la necesidad de eslabones, las analogías entre MLL, MFL y MCL se vuelven más fáciles de describir. Dado que ya se ha demostrado que, en MLL, las cerraduras y las balanzas son suficientes (aunque no son la única manera) para crear sistemas Turing completos, se deduce que si existen mecanismos análogos en MCL, MCL también se pueden usar para crear sistemas Turing completos. Ya se ha indicado que, con respecto a las primitivas básicas, se pueden comparar los eslabones MLL con cables MCL, y se pueden comparar las juntas rotatorias MLL con poleas MCL. Para demostrar esto, y mostrar exactamente cómo se pueden usar cables y poleas para crear los mecanismos subyacentes de la computación Turing completa, se describe el diseño de una cerradura y una balanza.

Cerraduras MCL

Pueden crearse cerraduras en MCL usando manillas que son parte integral de, o se fijan a, cables u otras estructuras. Con el diseño apropiado, estas manillas permiten la reproducción de las características de una cerradura MLL. Específicamente, con respecto a una realización binaria con dos entradas, desde el estado (0,0) desbloqueado, hay dos movimientos permitidos, y son aquellos desde el estado (0,0) desbloqueado hacia uno de los estados bloqueados, (0,1) o (1,0). Desde cualquiera de los estados bloqueados, el único movimiento permitido es volver al estado desbloqueado. Téngase en cuenta que no hay ninguna razón por la cual las manillas no puedan fijarse a prácticamente cualquier estructura, según sea conveniente, y la construcción de cerraduras no es el único uso de las manillas.

Una forma de implementar la lógica deseada se representa en las Figuras 33a-c. En la figura 33a, un primer cable 3301 es atravesado por un segundo cable 3302. Dos manillas 3303 y 3304, y 3305 y 3306, respectivamente, se fijan a cada cable. La Figura 33a muestra la cerradura en la posición (0,0), donde cualquier cable es libre de moverse. La Figura 33b muestra la cerradura en la posición (0,1), habiéndose movido el segundo cable, bloqueando así el primer cable en virtud del hecho de que una de las manillas 3305 del segundo cable está entre las manillas 3303 y 3304 del primer cable, evitando su movimiento en cualquier dirección. La Figura 33c muestra la cerradura en la posición (1,0), habiéndose movido el primer cable, bloqueando así el segundo cable.

Son posibles muchos otros diseños que permiten que las manillas actúen como cerraduras. La Figura 34, la Figura 35, la Figura 36 y la Figura 37 representan un diseño de manilla ilustrativa que también puede imponer la restricción de que el único movimiento permitido en una cerradura desde el estado (0,1) o (1,0) es hacia (0,0). Este diseño de manilla es más complejo, pero requiere solo dos manillas (una en cada cable) en lugar de cuatro, para crear la lógica de bloqueo deseada.

La Figura 34 muestra una única manilla 3401. Generalmente, un cable se uniría a cualquier extremo (no mostrado), pero tales manillas podrían usarse en otros escenarios también, tales como conectadas a eslabones de MLL.

La Figura 35 muestra cómo dos de dichas manillas 3501 y 3502 se engranan entre sí para formar una cerradura. En esta figura, la cerradura se muestra en el estado en blanco (lo que significa, ninguna manilla se coloca para bloquear el movimiento de la otra).

La Figura 36 y la Figura 37 representan las mismas manillas 3501 y 3502 en el estado (0,1) y (1,0) (o viceversa; ya que el mecanismo es simétrico, la manivela que se define como la manilla 0 y la que se define como la manilla 1 es arbitraria).

Puede verse, al inspeccionar la forma de estas manillas y sus posiciones relativas en los estados en blanco, (0,1) y (1,0), que si dos cables u otras estructuras interactúan a través del movimiento apropiado de dichas manillas, esta restricción de que el único movimiento permitido desde el estado (0,1) o (1,0) sea hacia el estado (0,0) se aplica.

Óvalos de MCL

Conceptualmente, puede ser útil definir una estructura en MCL denominada “óvalo”, ya que esta disposición de partes básicas es una forma de crear mecanismos más complejos tales como balanzas y registros de desplazamiento.

Como se representa en la Figura 39, una forma de implementar un óvalo utiliza un bucle cerrado de cable 3801 (denominado “cable lógico” para distinguirlo de cables que sirven como entradas/salidas, incluidos los que proporcionan señales de reloj, aunque esta distinción es solo para claridad de la descripción, ya que los cables lógicos también pueden proporcionar entrada/salida, como en el caso de los óvalos cruzados que pueden usarse para formar celdas y registros de desplazamiento), que puede incluir una o más estructuras, tales como la manilla 3802, y que pasan alrededor de una o más poleas 3803 (se representan dos poleas, pero otros números pueden usarse para cambiar las características de forma, longitud, vibración y entrópicas, u otras características diferentes de la oval, que a pesar del nombre, no necesariamente deben tener la forma oval). Si una o más de las poleas pueden ser no ancladas, pueden incluirse medios de guía tales como el raíl 3804. Las poleas no ancladas pueden accionarse (moverse a lo largo de sus medios de guía) mediante el cable 3805, que puede estar, p. ej., vinculado a una señal de reloj.

Se pueden incluir una o más carcassas de cable tales como las ilustradas por la carcassa 3806 para reducir la pérdida de energía, como se describe en otra parte de la presente memoria. Las manillas facilitan la interacción con otras estructuras y pueden conectarse a uno o más cables 3807 y 3808 de entrada/salida. Por sí mismo y en su forma más simple, un óvalo simplemente toma una entrada y puede (pero no tiene que) transmitirla como salida. Por ejemplo, si se mueve el cable 3807 y las poleas están ancladas, el lado opuesto del cable lógico también debe moverse, provocando el movimiento del cable 3808. Por lo tanto, el óvalo puede retransmitir datos, pero no tiene lugar ningún cálculo sustancial. Sin embargo, los óvalos pueden diseñarse para llevar a cabo cálculos al interactuar con otras estructuras (incluidos, p. ej., otros óvalos o cables). Cuando se combinan con cerraduras, esta es una manera de construir una balanza a través de MCL.

Balanzas de MCL

La Figura 39 representa una balanza como parte de un óvalo. Las balanzas y los óvalos también pueden servir como parte de un registro de desplazamiento. La balanza incluye la polea 3902 y la parte izquierda del cable lógico 3901. La Figura 39 representa un óvalo con poleas no ancladas y dos cables cruzados que proporcionan entrada de datos, proviniendo los dos cables cruzados, p. ej., de cables de datos u otro óvalo. Las estructuras opcionales tales como carcassas de cable se omiten para mayor claridad y, como es habitual, se supone que un bloque de anclaje está presente, pero no se representa. El cable lógico 3901 pasa alrededor de la polea 3902 (y su pareja, no etiquetada). Ambas poleas se montan en pistas, ilustradas por 3903. La línea de reloj 3904 acciona el mecanismo tirando de las poleas, lo que hará que se deslicen en sus pistas. El cable lógico tiene dos pares de manillas 3905 y 3906 y 3907 y 3908. Los cables 0 3909 y el cable 1 3910 proporcionan una entrada al óvalo. Cada cable cruzado tiene un par de manillas 3911 y 3912, y 3913 y 3914, respectivamente. Al cruzar el óvalo (en ángulos rectos en este diagrama, pero se pueden usar otros ángulos y diseños), los cables 0 y 1 pueden colocar sus manillas para interactuar con las manillas del óvalo. Las manillas triangulares 3915 y 3916 (mostradas como triangulares solamente para distinguirlas visualmente de las otras manillas;

esta forma no es significativa) se conectan a la línea de salida 1 3917 y a la línea de salida 0 3918, respectivamente. Esta configuración es solo a modo de ejemplo. Las líneas de salida podrían fácilmente, p. ej., colocarse de manera diferente, o conectarse a las manillas de cerradura apropiadas en lugar de usar manillas separadas.

La Figura 39, la Figura 40 y la Figura 41 difieren solo en la posición de las manillas de cable de entrada. En la Figura 39, ambas cerraduras están en la posición en blanco; lo que significa que las manillas de cable de entrada y las manillas de cable lógico no interactuarían si se accionara el mecanismo. En la Figura 40, el cable 3909 tiene manillas móviles 3911 y 3912 de manera que la manilla 3911 ahora está entre dos de las manillas en el cable lógico, 3905 y 3906. Esto puede considerarse una entrada de 0, ya que la línea de entrada cero se ha movido. Si el mecanismo se accionara en este estado, el lado superior del óvalo estaría impedido de moverse, ya que las manillas 3905, 3906, 3911 y 3912 forman una cerradura que luego se bloquea.

En la Figura 41, el cable 3909 no se ha movido, pero en cambio el cable 3910 se ha movido. Esto puede considerarse una entrada de 1, ya que el cable 1 se ha movido. El efecto es bloquear el lado opuesto del óvalo colocando la manilla 3913 entre las manillas 3907 y 3908. Este bloqueo de un lado o el otro de un óvalo es análogo al bloqueo de un lado o el otro del eslabón apropiado en una balanza de MLL. El funcionamiento de la balanza basada en óvalo es el siguiente: Suponiendo que la posición inicial de las poleas está en el lado izquierdo de sus respectivas pistas. Cuando se establecen las entradas, los cables de entrada bloquean ya sea el lado superior o el inferior del óvalo. A continuación, la línea de reloj mueve las poleas de la izquierda a la derecha. El movimiento lateral de las poleas es el mismo independientemente de las entradas. Sin embargo, el lado del cable lógico que se mueve está determinado por las entradas. Cualquiera que sea el lado del cable lógico que se bloquee, se ve obligado a permanecer estacionario. Por lo tanto, cuando las poleas se mueven, solo se mueve el lado desbloqueado del cable lógico. Esto da como resultado el movimiento de la línea de salida 0 si se proporcionó una entrada de 0, y el movimiento de la línea de salida 1 si se proporcionó una entrada de 1.

La Figura 42 muestra la posición del mecanismo suponiendo que se proporcionó una entrada de 1 y, a continuación, la línea de reloj movió las poleas a la derecha. Dado que la manilla 3913 se había movido entre las manillas 3907 y 3908, el lado inferior del óvalo estaba bloqueado. Por lo tanto, cuando las poleas se mueven a la derecha, el cable lógico debe seguir de la única manera posible: enrollándose el cable lógico de manera que la manilla 3915 y, por lo tanto, la línea de salida 1 3917, se muevan hacia la derecha. Téngase en cuenta que los cables de datos tales como 3909 y 3910 no son la única manera de proporcionar entrada a un óvalo, y cables de salida tales como 3917 y 3918 no son la única manera de obtener una salida de un óvalo. Por ejemplo, los óvalos cruzados pueden interactuar directamente, sirviendo el cable lógico de un óvalo como una entrada a un óvalo vecino. Dado que, cuando se combinan con cerraduras, se puede usar una entrada para controlar qué lado de un óvalo se mueve, esto es análogo al funcionamiento de una balanza de MLL o MFL. Y, dado que se demostró que los sistemas Turing completos son posibles usando solo cerraduras y balanzas de MLL, se deduce que MCL también puede implementar sistemas Turing completos.

Masa móvil

Una ventaja de algunas realizaciones de MCL es una masa móvil reducida en comparación con algunas realizaciones de MLL o MFL. Debido a que no se requiere que los cables sean rígidos, pueden tener una sección transversal más pequeña y una masa correspondientemente menor que los eslabones MLL de longitud equivalente. Un ejemplo convencional de este principio es comparar la masa de un cable con la masa de una estructura de tipo viga. En general, una estructura que solo tiene que soportar fuerzas de tracción se puede hacer menos maciza que una estructura que también debe soportar, p. ej., fuerzas de compresión o flexión. A una escala molecular, los ejemplos de estructuras fuertes pero flexibles que podrían usarse como cable incluyen carbyne (carbono acetilénico lineal), poliácenos, polietileno y polipeanos, aunque podrían usarse muchas otras estructuras.

Una desventaja potencial del uso de cables es que la flexibilidad puede permitir modos de vibración que no existirían en una estructura más rígida. Además, estos modos de vibración pueden cambiar a medida que cambia la longitud de una sección determinada de cable. Por ejemplo, si la distancia entre dos poleas cambia, cambiando así la longitud del segmento de cable entre ellas, los modos de vibración permitidos pueden cambiar, como si se tocara una cuerda de guitarra en diferentes posiciones. Esto también da como resultado cambios entrópicos en el sistema. Cualquiera de estos efectos puede conducir a la disipación de energía.

Sin embargo, estos problemas de vibración y entrópicos se pueden resolver manteniendo baja la masa móvil de los mecanismos. Esto se puede lograr restringiendo los cables de tal manera que se evite que puedan vibrar libremente. Una realización de este concepto sería que los cables se encuentren en zanjais en el bloque de anclaje. Si se considera que dichas zanjais tienen una sección transversal rectangular (aunque este no es necesariamente el caso), restringirían el cable en tres lados, estando abierto el cuarto lado para facilitar el encaminamiento del cable fuera de la zanja para interactuar con las poleas. También es posible restringir un cable en todos los lados, tal como la forma en que Bowden envuelve su cable interno en una funda o carcasa. Si esta funda es relativamente rígida, y el espacio interno de la funda se dimensiona adecuadamente en comparación con el cable, esencialmente no se permitirá ninguna vibración dentro de la funda. Un ejemplo molecular de esto sería un cable de poliino en un (9,0) SWNT (nanotubo de pared simple), pero obviamente muchas estructuras podrían usarse, preferentemente aquellas que son rígidas, se ajustan estrechamente al cable y la funda, y que permiten que el cable se deslice libremente en la funda (pero sin que vibre sustancialmente).

Si bien segmentos cortos de cable pueden estar expuestos entre zanjas, fundas u otros tipos de carcassas, y donde el cable entra en contacto con una polea, estos segmentos serán relativamente cortos en comparación con la longitud total del cable, marginando así la pérdida de energía por las vibraciones del cable y los cambios entrópicos. Dado que las carcassas del cable no necesitan moverse con el cable, la masa móvil se mantiene baja, permitiendo potencialmente sistemas con frecuencias de conmutación más altas en comparación con los sistemas que requieren más eslabones rígidos macizos en lugar de cables flexibles.

Además, se podría implementar un sistema de cable con fluidos dentro de las carcassas. Un tapón sólido en un extremo de la carcasa empujaría sobre el fluido, que a su vez empujaría otro tapón en el extremo opuesto de la carcasa. Al igual que un bucle cerrado de cable, al accionar en cualquier extremo, esto puede proporcionar efectivamente un "cable" (aunque esté hecho de un fluido, que incluye un gas) que puede empujarse o tirarse accionando el extremo apropiado. Dichos diseños también podrían usarse para implementar balanzas y cerraduras, moviendo las partes hidráulicamente en lugar de a través de un eslabón o cable sólido. Aunque un sistema hidráulico no se denominaría tradicionalmente cable, se considera un sistema de cable en la presente memoria porque el funcionamiento lógico y mecánico es casi idéntico al de un cable sólido.

Sistemas de tipo 1-4

Como se mencionó anteriormente, debido al uso de trinquetes y gatillos, retenes, resortes u otros mecanismos que almacenan y luego liberan energía potencial de una manera no directamente vinculada a los grados de libertad computacionales del sistema, todos los sistemas Turing completos preexistentes para la computación mecánica pueden clasificarse como de tipo 1. Debido al posible ahorro de energía, en igualdad de condiciones, se preferirían los sistemas de tipo 2-4 a los sistemas de tipo 1, siendo los sistemas de tipo 4 los más preferidos. MLL, MFL y MCL son todos capaces de crear sistemas de tipo 2-4. De hecho, la mayoría de las realizaciones descritas en la presente memoria darían como resultado sistemas de tipo 4, mientras que la adición, p. ej., de resortes a algunos mecanismos (tales como entre la cerradura gradual representada en la Figura 9 y otros mecanismos, para permitir la holgura) podría dar como resultado un sistema de tipo 2, y algunos diseños que, p. ej., podrían dejar cerraduras en el estado (0,0) con alguna frecuencia no trivial podrían dar como resultado un sistema de tipo 3 (aunque esto se puede evitar con un diseño adecuado; que las cerraduras estén en el estado (0,0) no necesariamente significa que las partes son libres de moverse, como se puede ver en el mecanismo descrito en la presente memoria).

Puede que no sea evidente de inmediato que MFL puede usarse para crear sistemas de tipo 3-4, ya que puede parecer que las flexiones almacenan energía potencial por su propia naturaleza. De hecho, algunos diseños basados en flexión, si usan las flexiones para almacenar energía potencial y luego liberarla con algún efecto sobre el sistema, se clasificarían como de tipo 1 o tipo 2. Sin embargo, en MFL, no es necesario utilizar flexiones para un almacenamiento de energía potencial. Más bien, su función puede ser únicamente la de proporcionar restricción cinemática, tal como lo hace la estructura análoga en MLL, la junta rotatoria. Como tal, la fuerza necesaria para doblar una flexión puede ser arbitrariamente pequeña, siempre que la flexión aún proporcione la rigidez necesaria con respecto a los grados de libertad relevantes. Esto lleva a la conclusión de que el almacenamiento de energía potencial de las flexiones puede ser trivial, al igual que la energía potencial almacenada en el estiramiento de cables de MCL, o el estiramiento, la flexión o la compresión de eslabones de MLL.

Además, incluso si la fuerza requerida para doblar una flexión fuera sustancial, dado que las flexiones no se usan para accionar el movimiento en un sistema de tipo 3-4, pueden diseñarse sistemas donde la energía potencial neta de las flexiones es esencialmente 0. Por ejemplo, un par de flexiones conectados a un eslabón podrían pretensarse en direcciones opuestas. El movimiento del eslabón en una dirección aumentaría la energía potencial de una de las flexiones, mientras que disminuiría la energía potencial de la otra flexión, dando como resultado ningún cambio neto (y, por lo tanto, ningún aumento neto en la fuerza requerida para mover el eslabón) a lo largo de algún intervalo de movimiento permitido.

Resumen

Se han descrito tres paradigmas ilustrativos para la computación mecánica, MLL, MFL y MCL. Cada uno de estos paradigmas es capaz de proporcionar tanto la lógica combinatoria como la lógica secuencial requeridas para crear un sistema computacional Turing completo. Cada paradigma de diseño también permite la computación reversible, y las simulaciones de un mecanismo a escala molecular indican que las realizaciones diseñadas adecuadamente de MLL pueden calcular con niveles de disipación de energía bajo el límite de Landauer. No existe razón para pensar que MFL y MCL no puedan proporcionar una eficiencia similar.

Se han descrito cuatro clases de sistemas de computación, designados de tipos 1-4. Los sistemas de tipo 1 tienen el potencial final más bajo de eficiencia energética, y son el único tipo de sistema computacional habilitado anteriormente. MLL, MFL y MCL comparten paralelos físicos y lógicos, en algún sentido son tres realizaciones de los mismos conceptos. Cada una es capaz no solo de la computación Turing completa, sino también de proporcionar los sistemas de tipo 2, tipo 3 y tipo 4 (solos o en combinación entre sí), lo que permite una menor disipación de energía. Cada una también tiene un número muy bajo de tipos de primitivas requeridos, requiriendo MLL y MFL solo dos partes básicas y requiriendo MCL tres, lo que reduce la complejidad del diseño, fabricación y ensamblaje del sistema. Además, no solo se requiere un número muy pequeño de partes básicas, sino que ninguna de las partes básicas incluye engranajes, trinquetes y gatillos, retenes o muchos otros mecanismos comunes que se usan ampliamente en otros sistemas, pero que probablemente disipan energía excesiva a través de fricción o vibración. Finalmente, cada una es

capaz de crear sistemas computacionales que usan conmutación seca; no es necesario desperdiciar energía aplicando fuerza a una parte o mecanismo básico, solo para encontrar que no se moverá debido a su estado lógico.

Considerando las enseñanzas en la presente memoria, incluidas múltiples realizaciones que demuestran los principios generales de diseño que consisten en poder proporcionar una computación Turing completa, reversible si se desea, a través de sistemas de tipo 2-4, con muy pocos tipos de primitivas, que se prestan para la creación de mecanismos eficientes en energía, tanto por la naturaleza de los propios mecanismos como porque dichos mecanismos y sistemas pueden diseñarse para usar la conmutación seca, resultará evidente que se pueden crear variaciones usando diferentes mecanismos o primitivas.

5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65

REIVINDICACIONES

1. Un mecanismo de computación mecánica binario que comprende:

5 un bloque de anclaje (301, 303); el mecanismo de computación mecánica binario se **caracteriza porque** comprende un conjunto, configurado para realizar una operación lógica combinatoria y/o una operación lógica secuencial con solo primitivas de lógica de eslabón mecánico, primitivas de lógica de flexión mecánica y/o primitivas de lógica de cableado mecánico para llevar a cabo la operación lógica combinatoria y/o la operación lógica secuencial; en donde
10 una o más de dichas primitivas definen una o más entradas (302, 304) para datos, codificados por la posición física de las entradas (302, 304), una o más de dichas primitivas definen una o más salidas (310, 311) para datos, codificados por la posición física de las salidas (310, 311), en donde
15 las primitivas se conectan entre sí para permitir o evitar selectivamente el movimiento de otras primitivas con respecto al bloque de anclaje (301, 303) basadas en la posición física de la una o más entradas (302, 304), de modo que una o más salidas (310, 311) son el resultado de la operación lógica en la una o más entradas (302, 304).
2. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde el conjunto requiere solo una combinación de eslabones (202, 204, 207), juntas rotatorias (201, 203, 206, 208), flexiones, cables (3301), manillas (3303, 3304, 3305, 3306) y poleas (3102) para llevar a cabo la operación lógica combinatoria y/o la operación lógica secuencial.
3. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde el conjunto requiere solo una combinación de eslabones (202, 204, 207) y juntas rotatorias (201, 203, 206, 208), una combinación de eslabones (202, 204, 207) y flexiones, o una combinación de cables (3301, 3302), manillas (3303, 3304, 3305, 3306) y poleas (3102) para llevar a cabo la operación lógica combinatoria y/o la operación lógica secuencial.
4. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde el conjunto requiere solo eslabones (202, 204, 207) y juntas rotatorias (201, 203, 206, 208) para llevar a cabo la operación lógica combinatoria y/o la operación lógica secuencial.
5. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde dicho mecanismo es una puerta lógica o un registro de desplazamiento.
6. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde dicho mecanismo es un registro de desplazamiento que consiste en cerraduras y balanzas.
7. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde dicho mecanismo es una puerta lógica que consiste en cerraduras y balanzas.
8. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 7, en donde la puerta lógica comprende una puerta lógica reversible.
9. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, que comprende un medio para la conmutación seca.
10. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde el mecanismo es de escala de micras a nanoescala.
11. El mecanismo de computación mecánica de la reivindicación 1, en donde el mecanismo es un mecanismo a escala molecular.

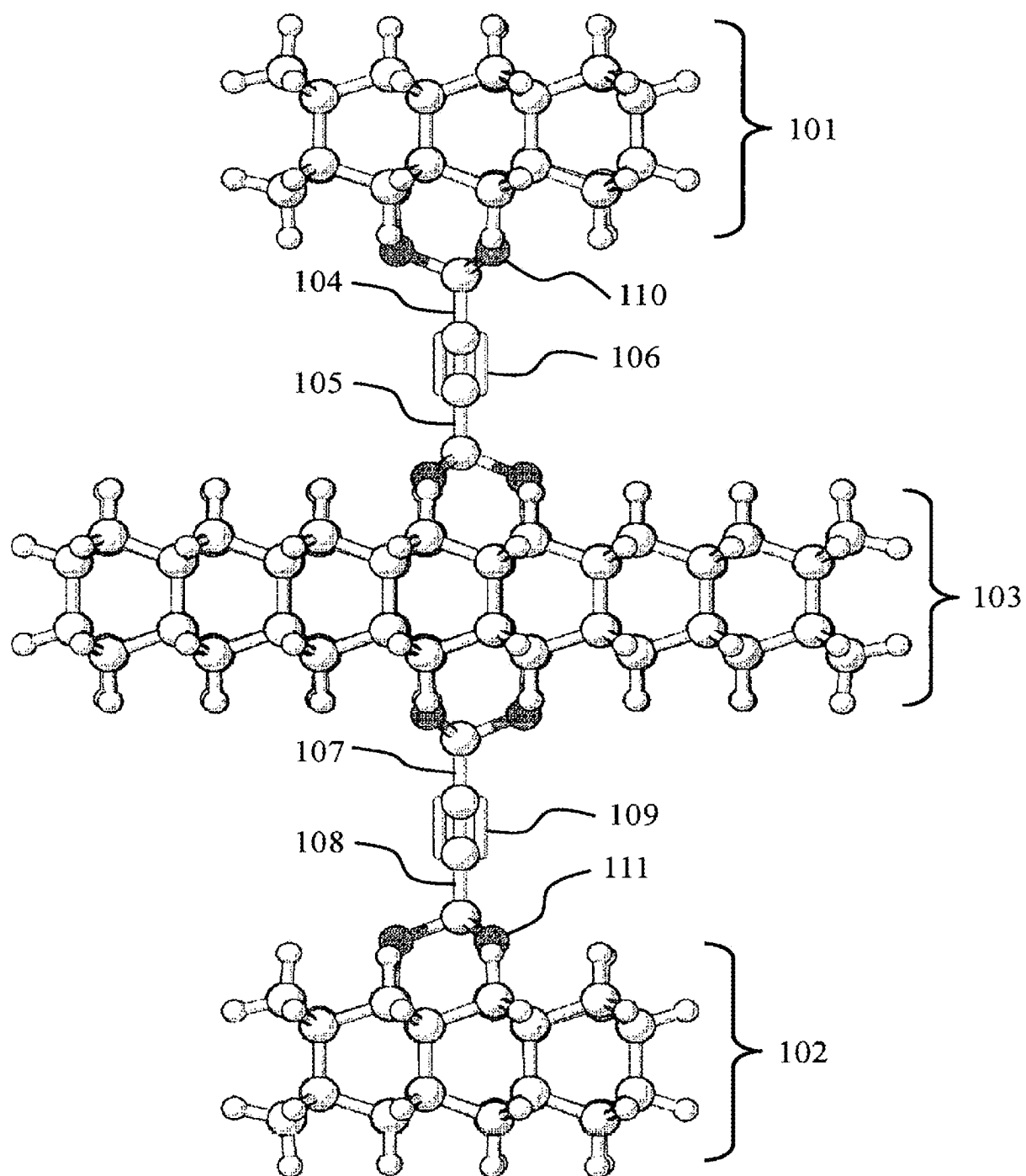


Figura 1

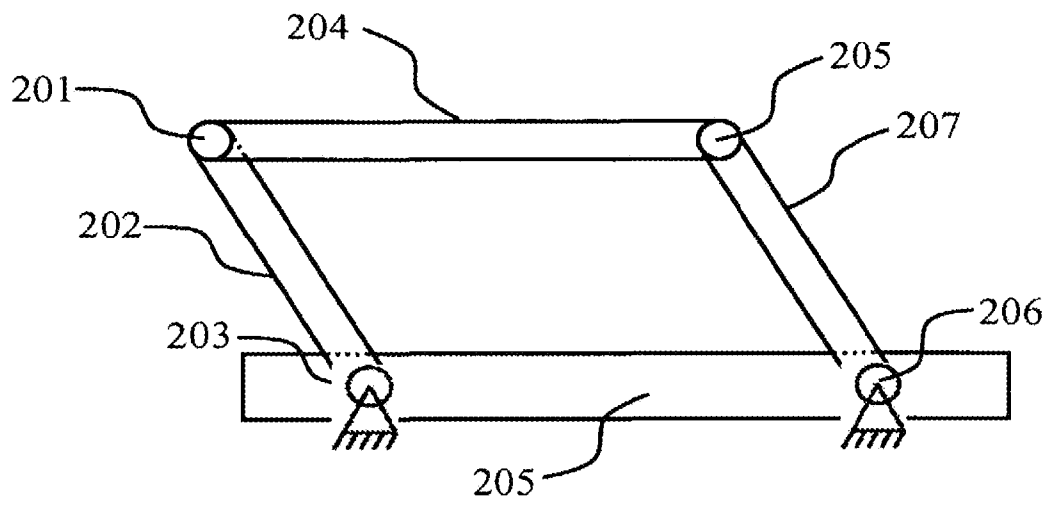


Figura 2

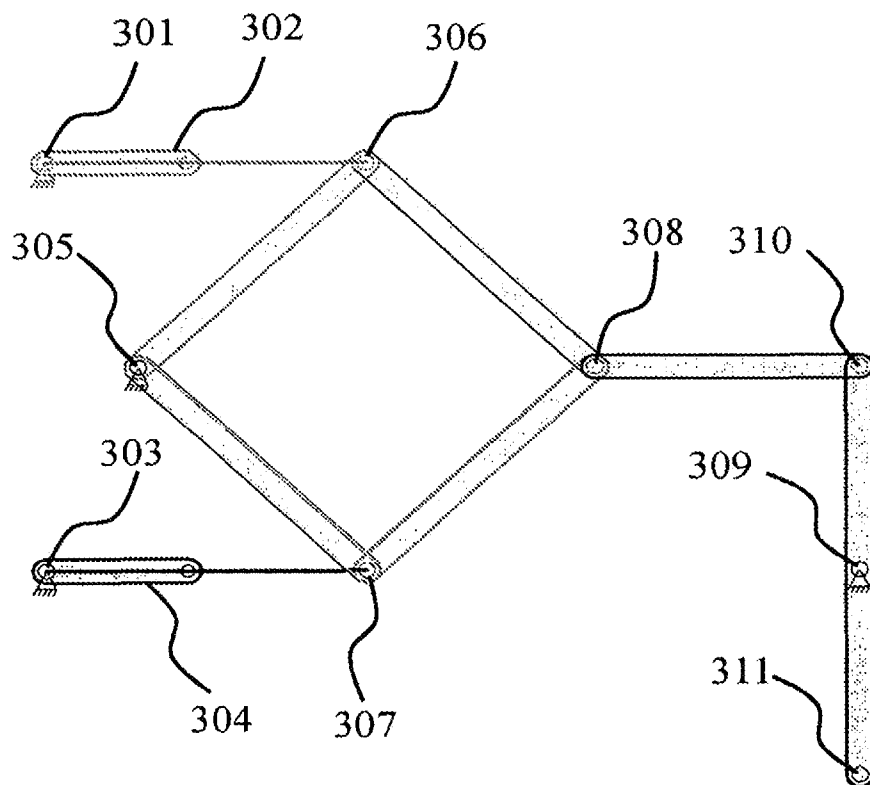


Figura 3

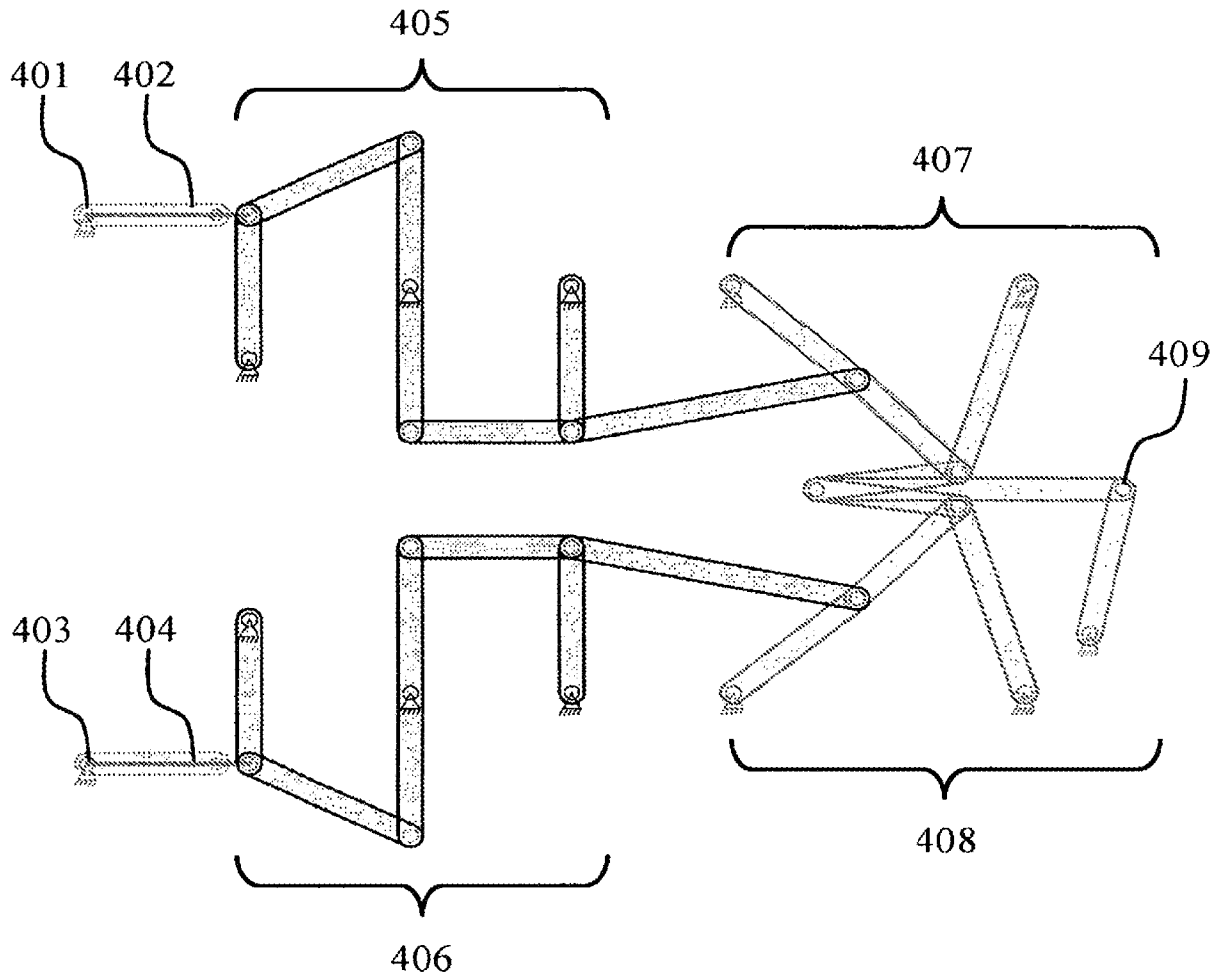


Figura 4

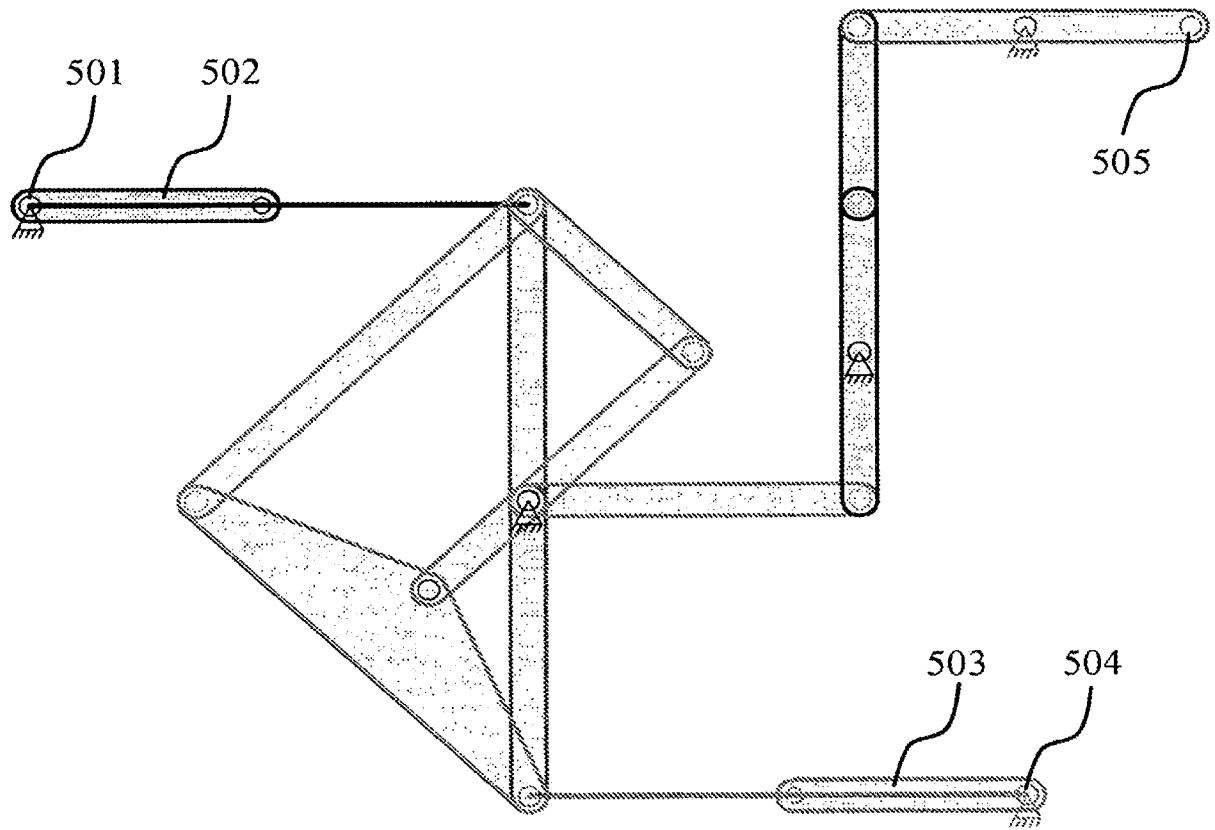


Figura 5

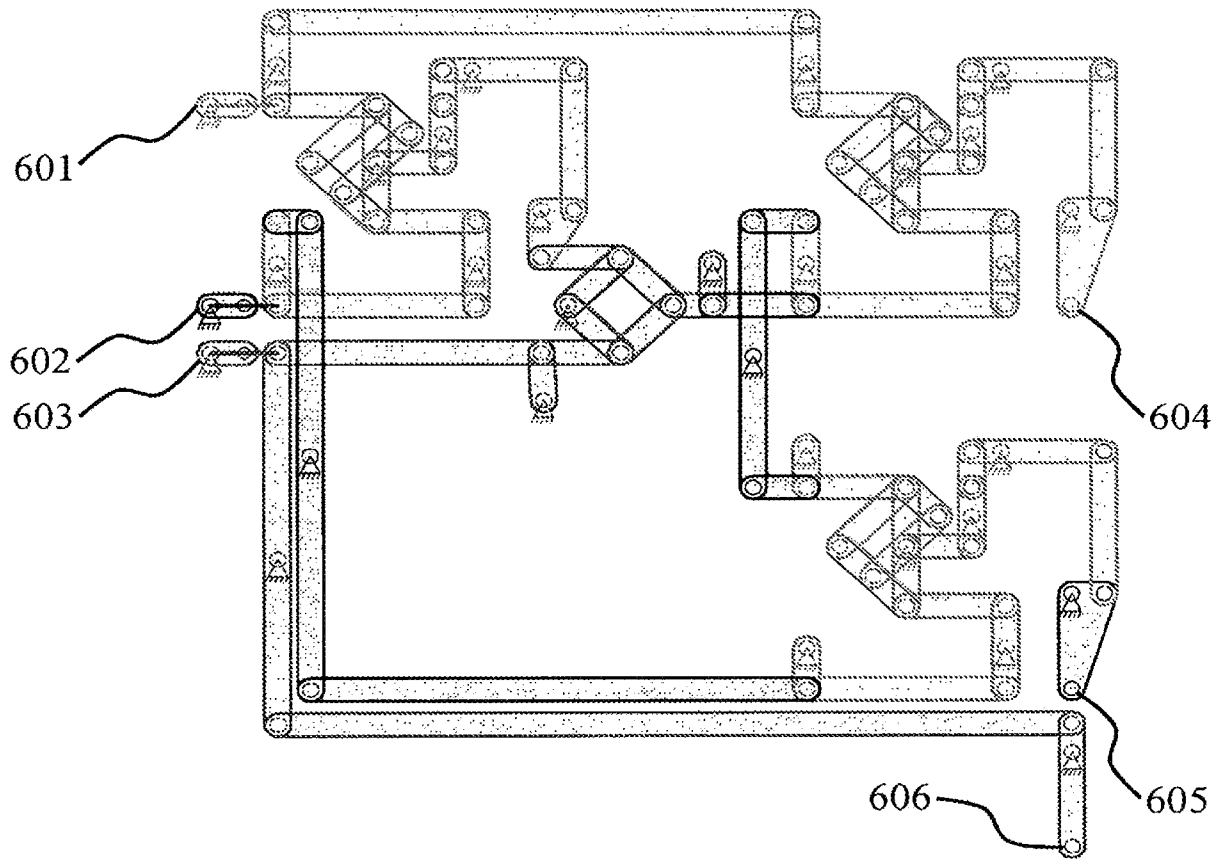


Figura 6

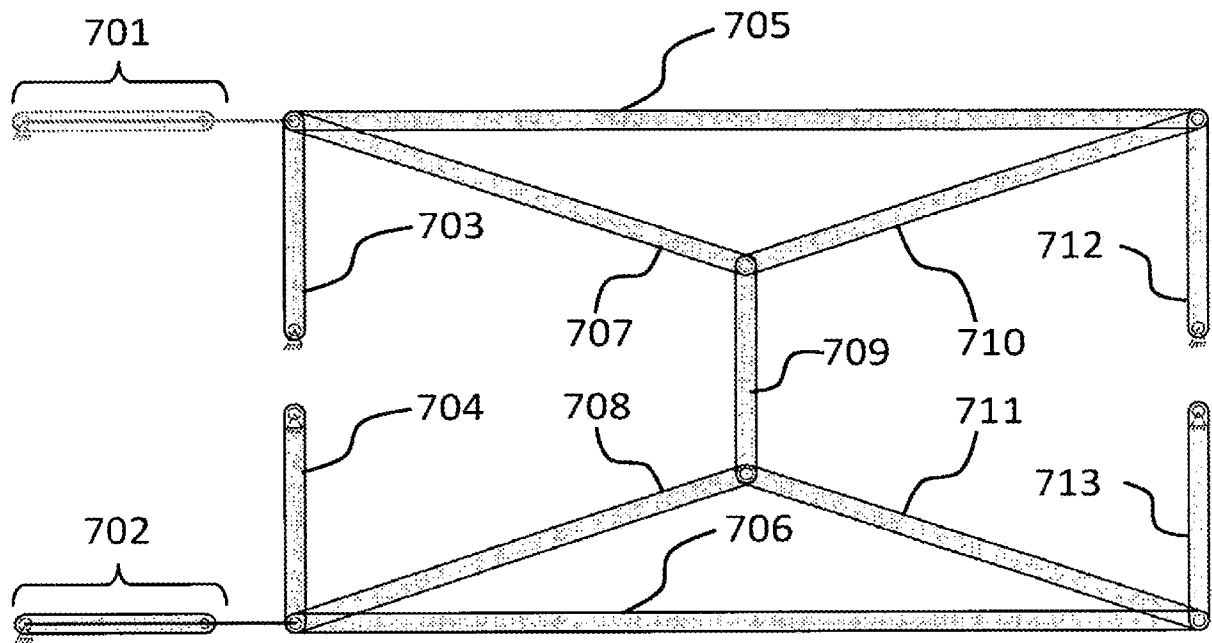


Figura 7

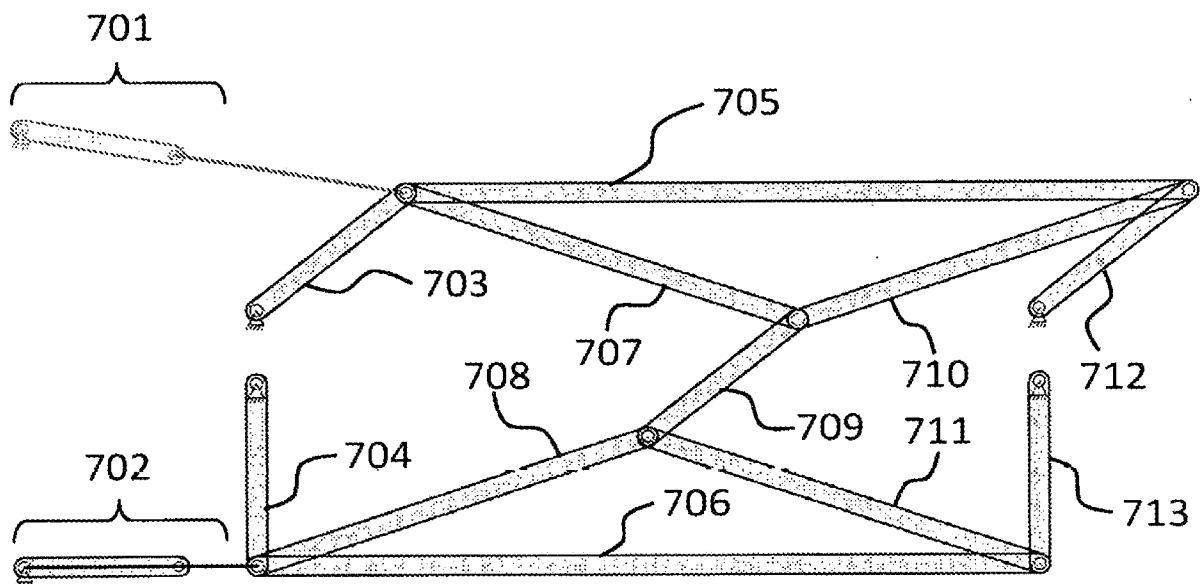


Figura 8

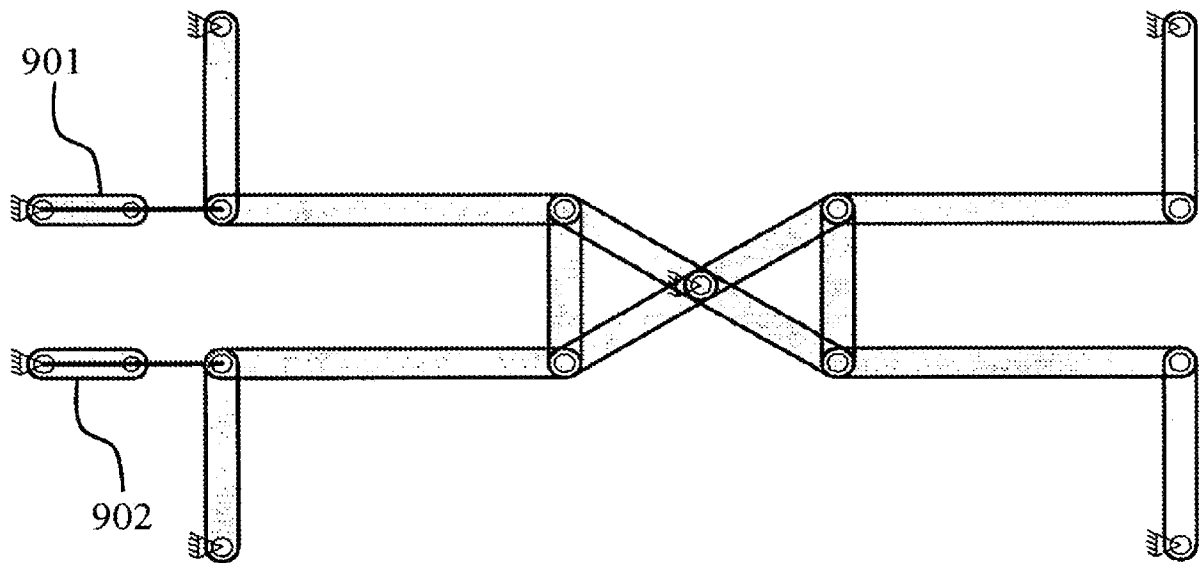


Figura 9

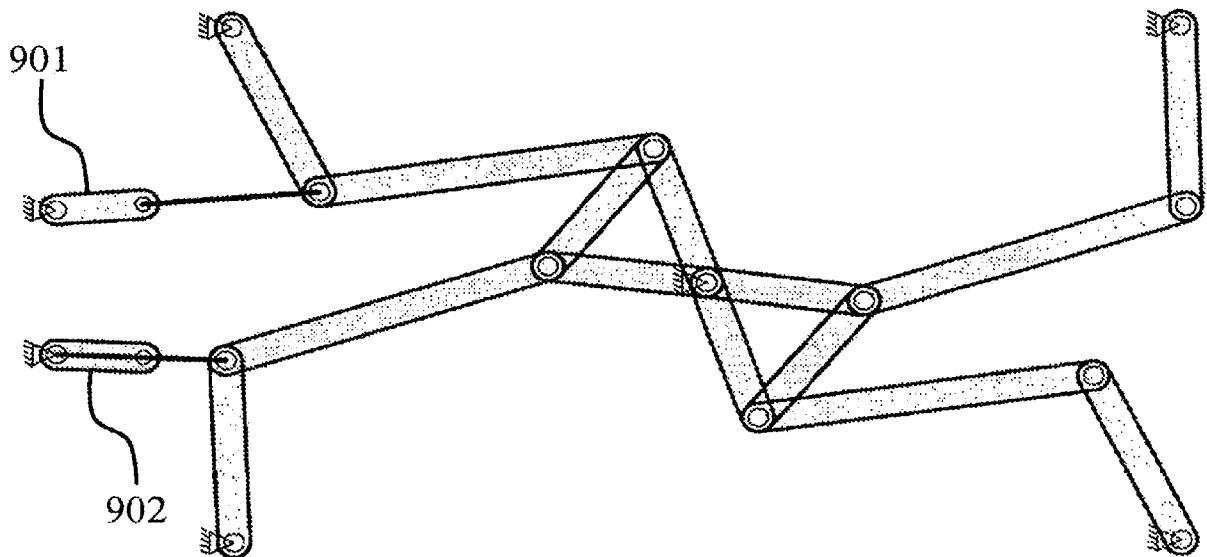


Figura 10

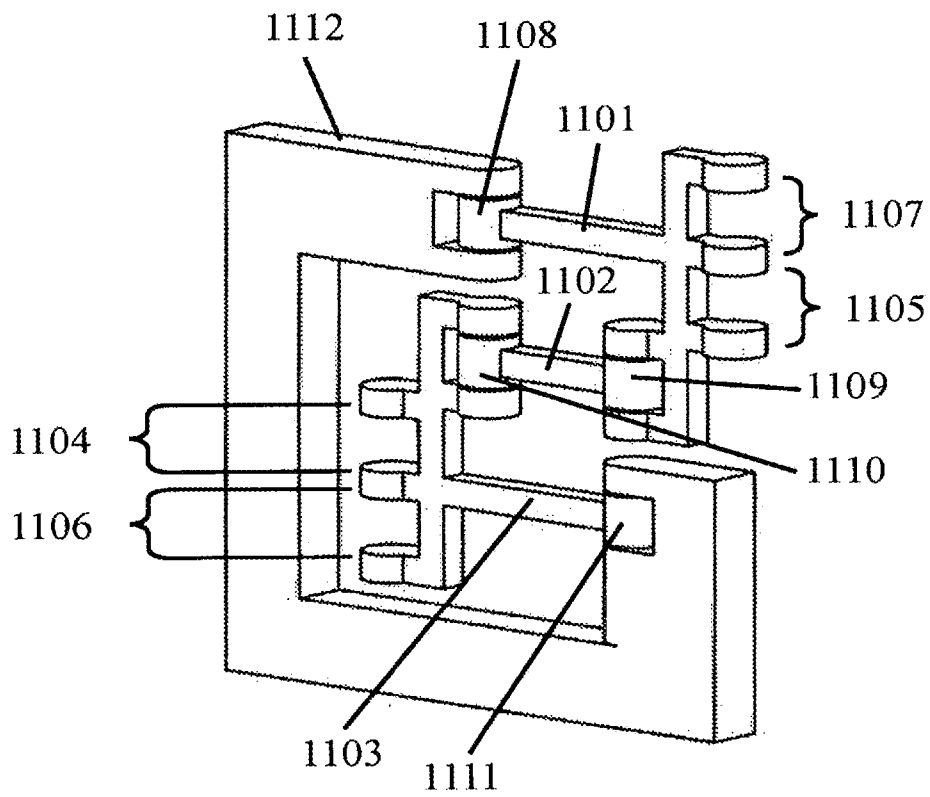


Figura 11

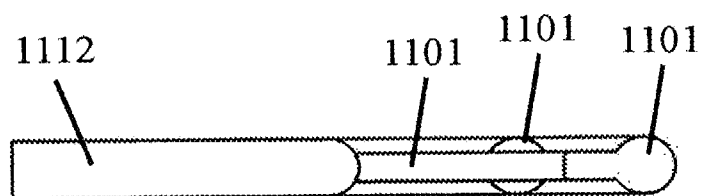


Figura 12

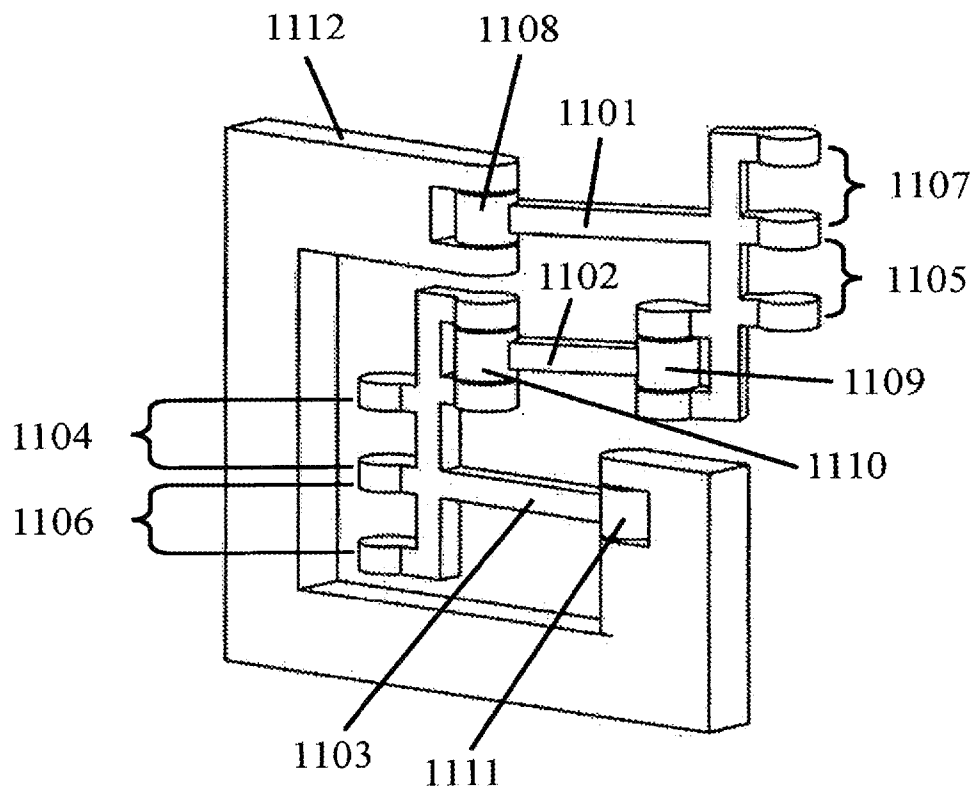


Figura 13

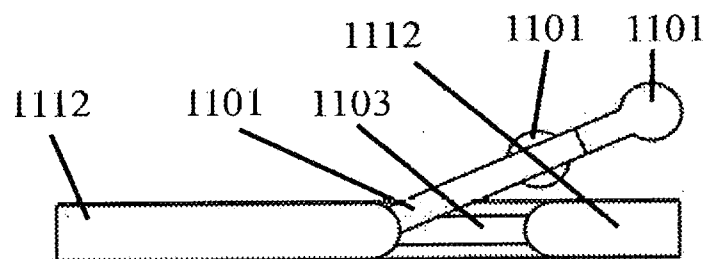


Figura 14

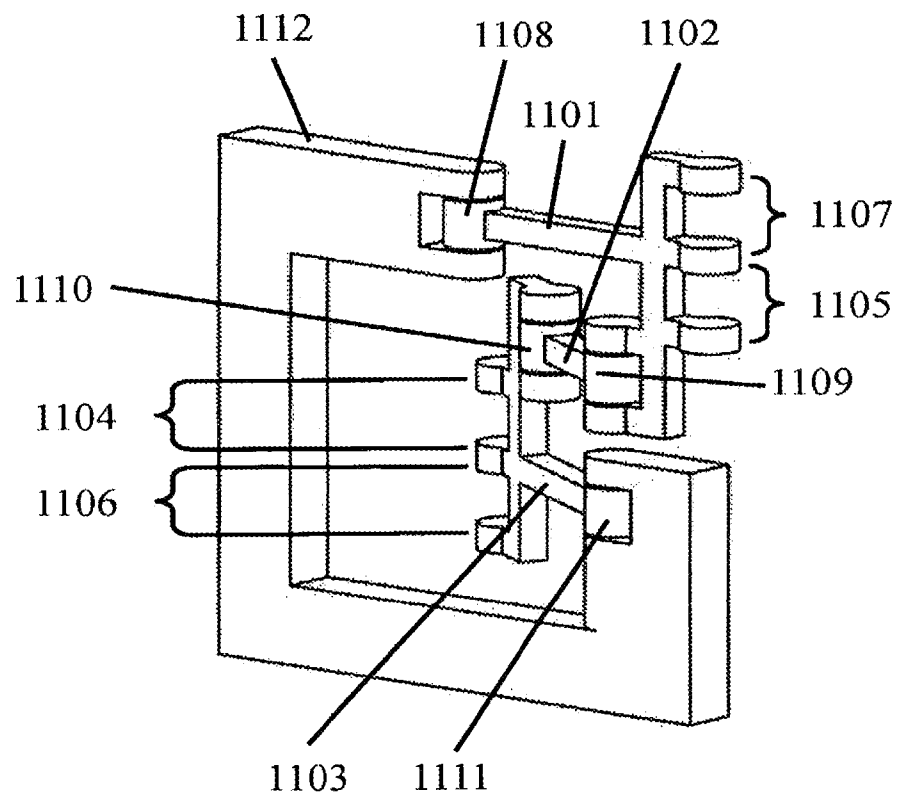


Figura 15

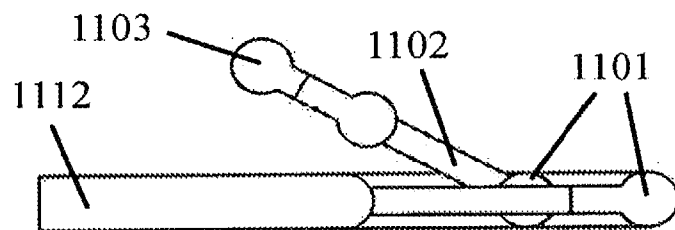


Figura 16

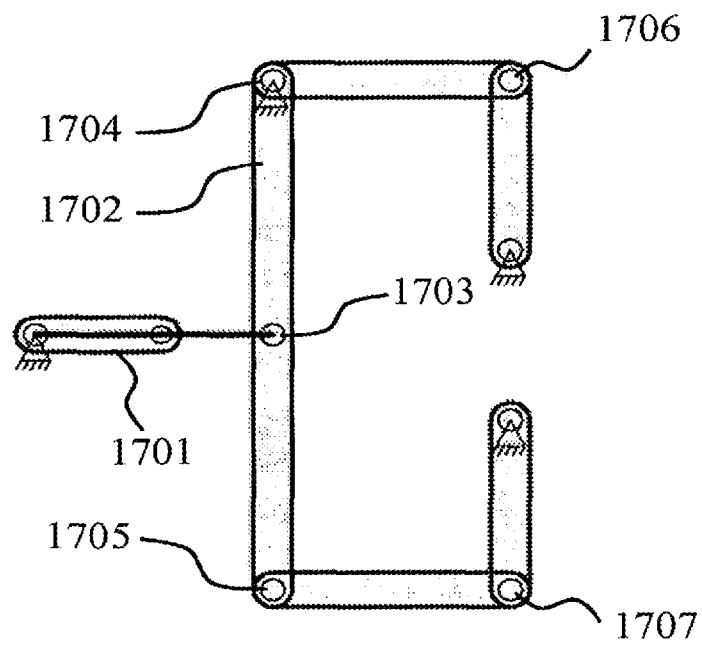


Figura 17

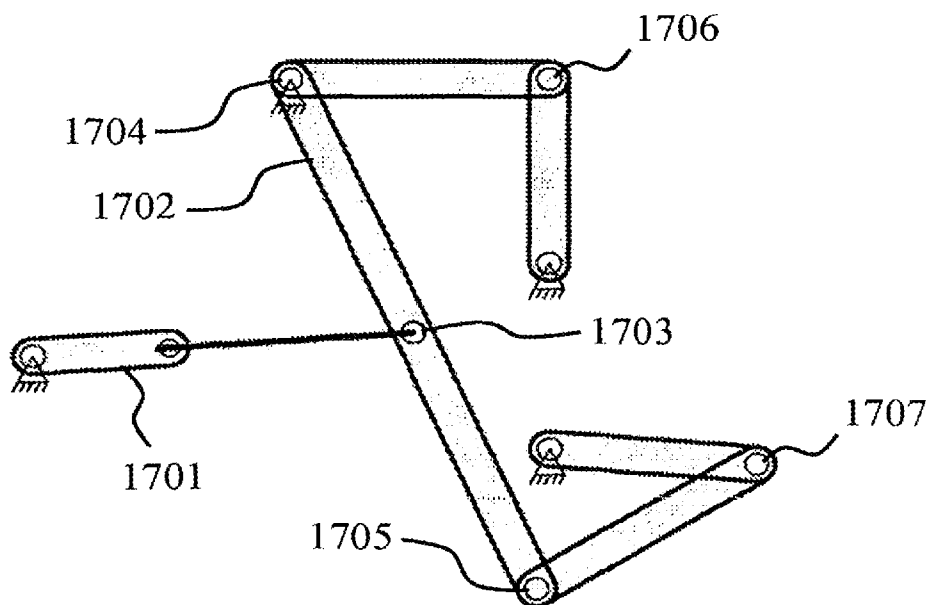


Figura 18

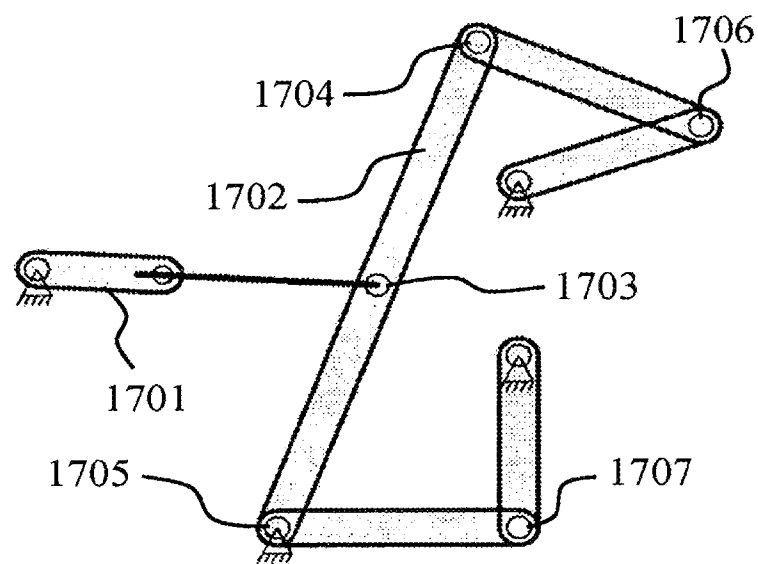


Figura 19

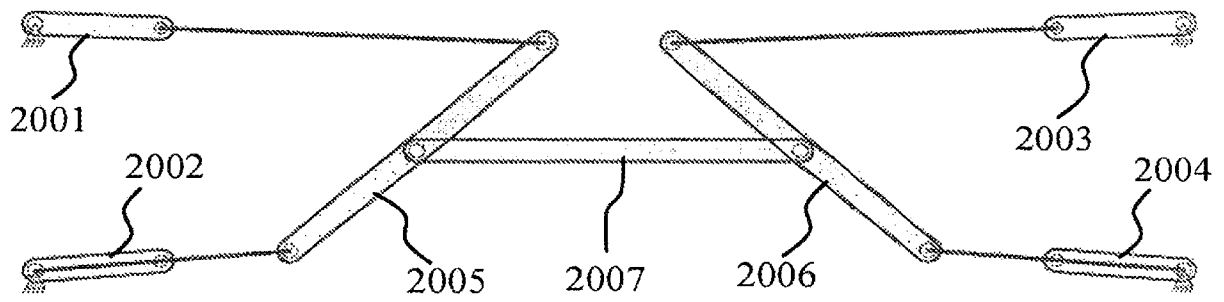


Figura 20

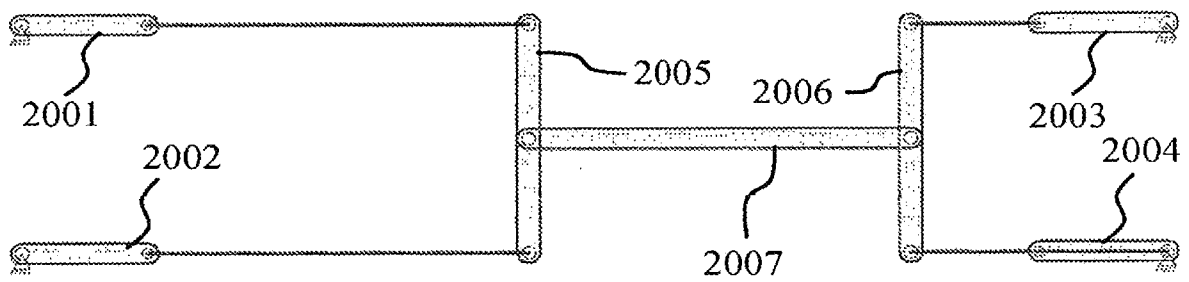


Figura 21

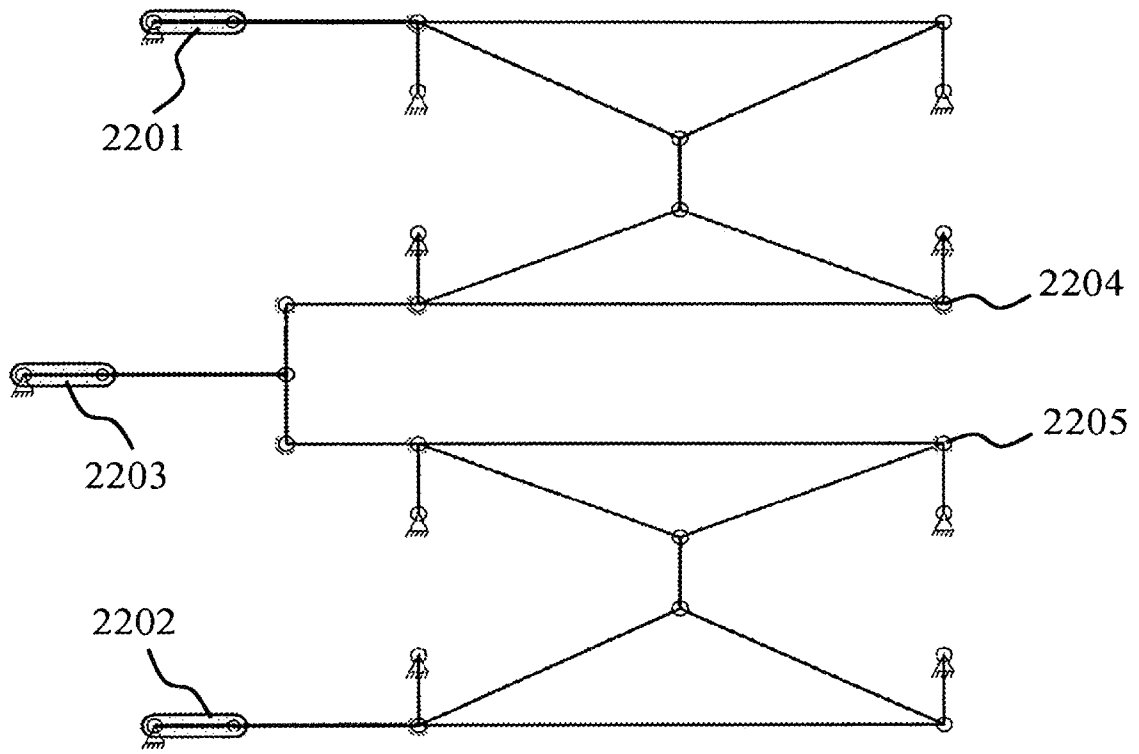


Figura 22

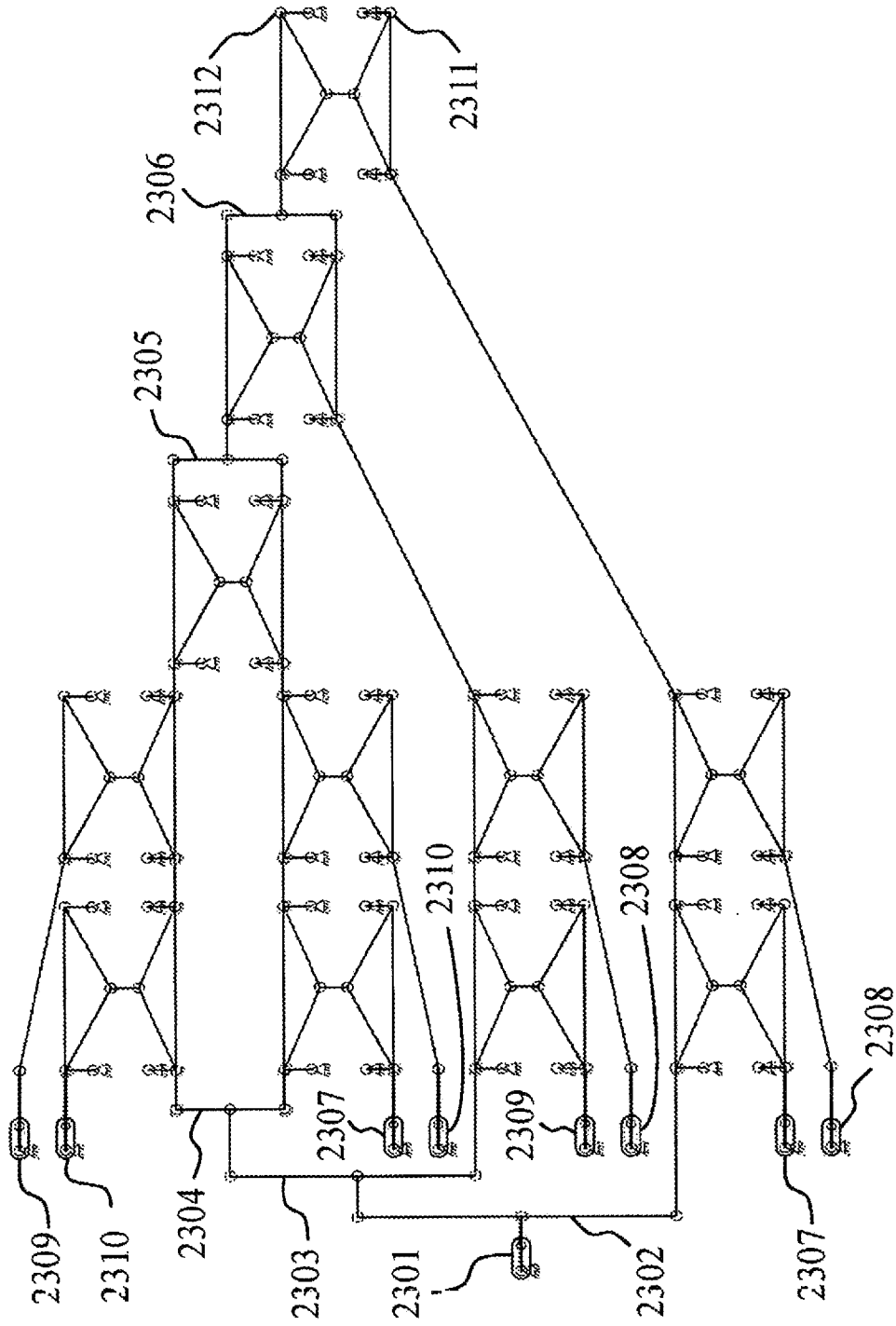


Figura 23

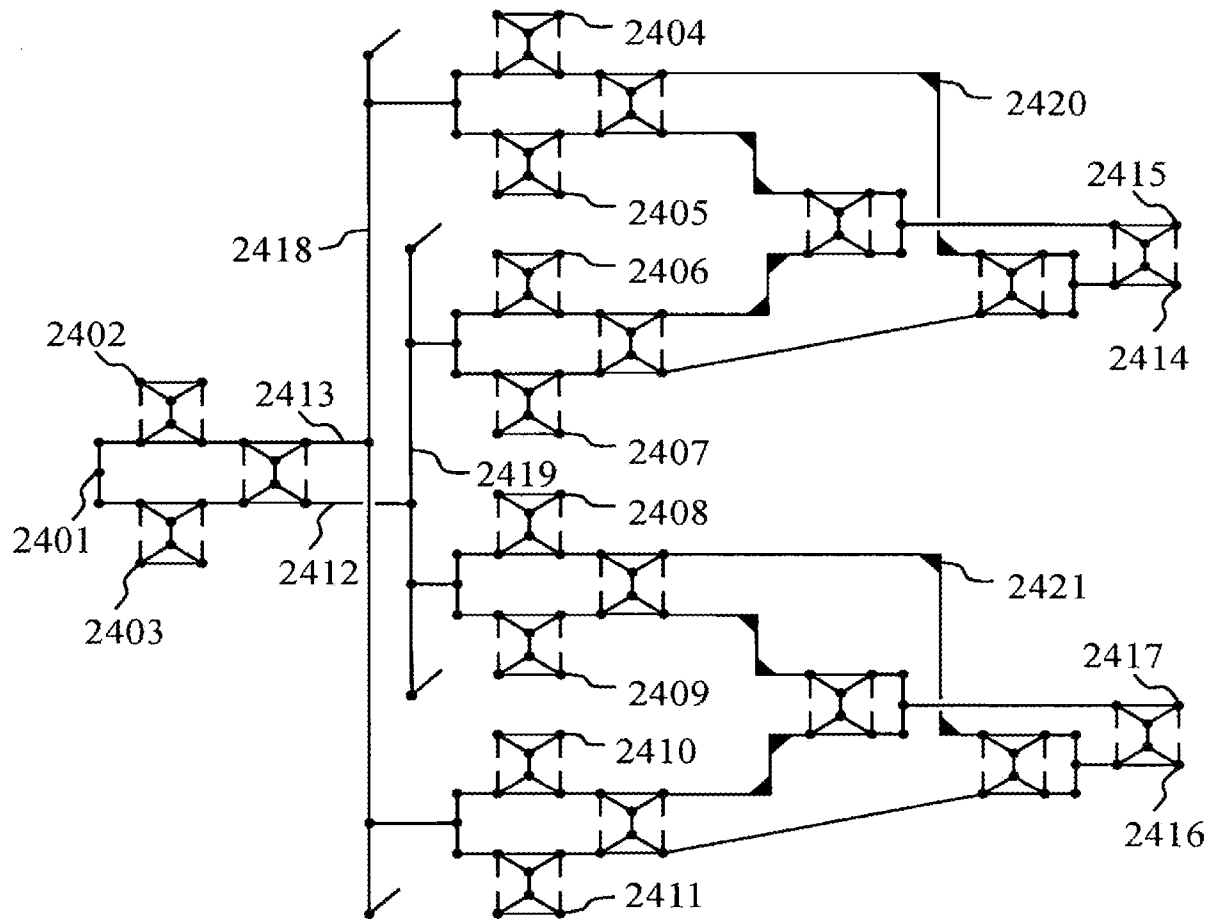


Figura 24

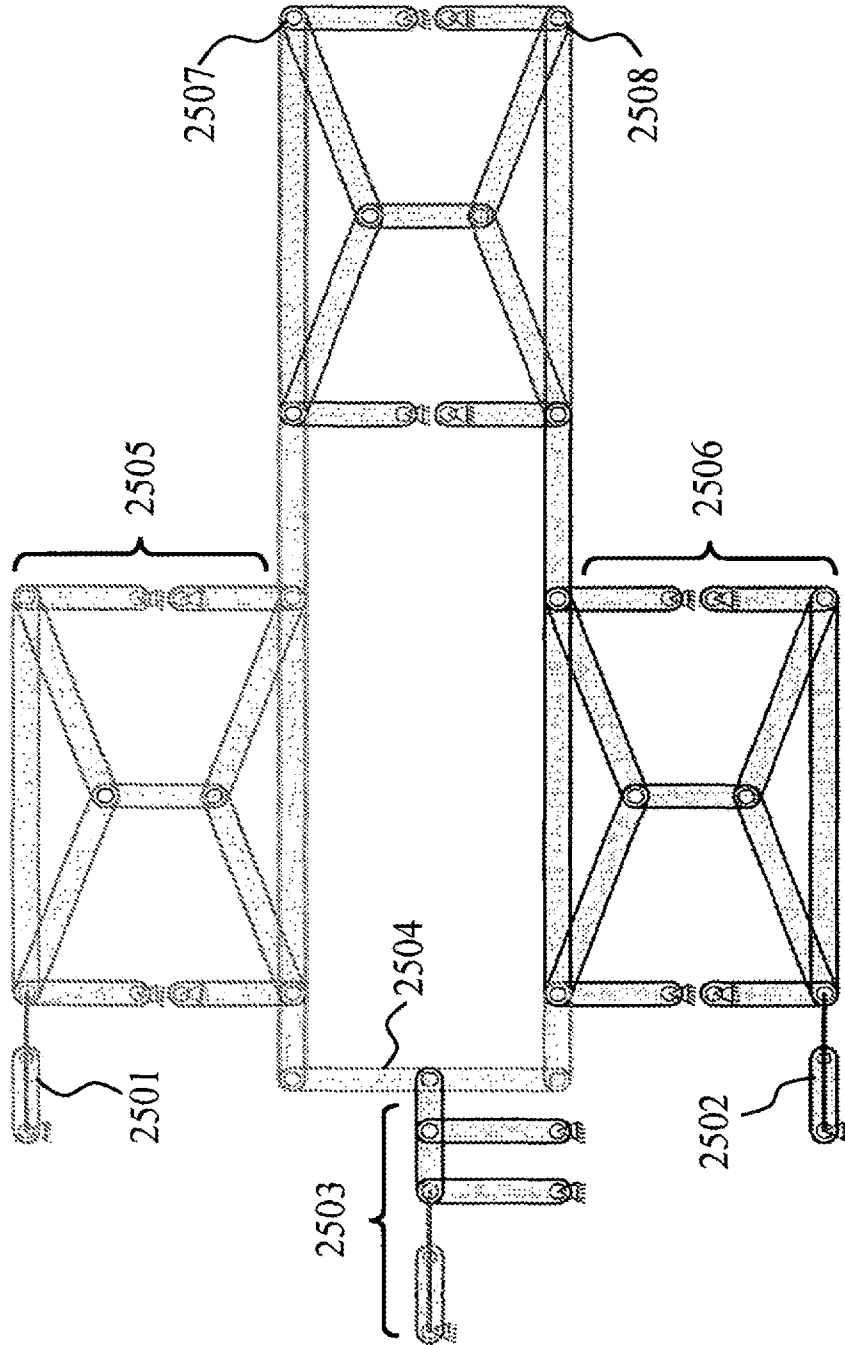


Figura 25

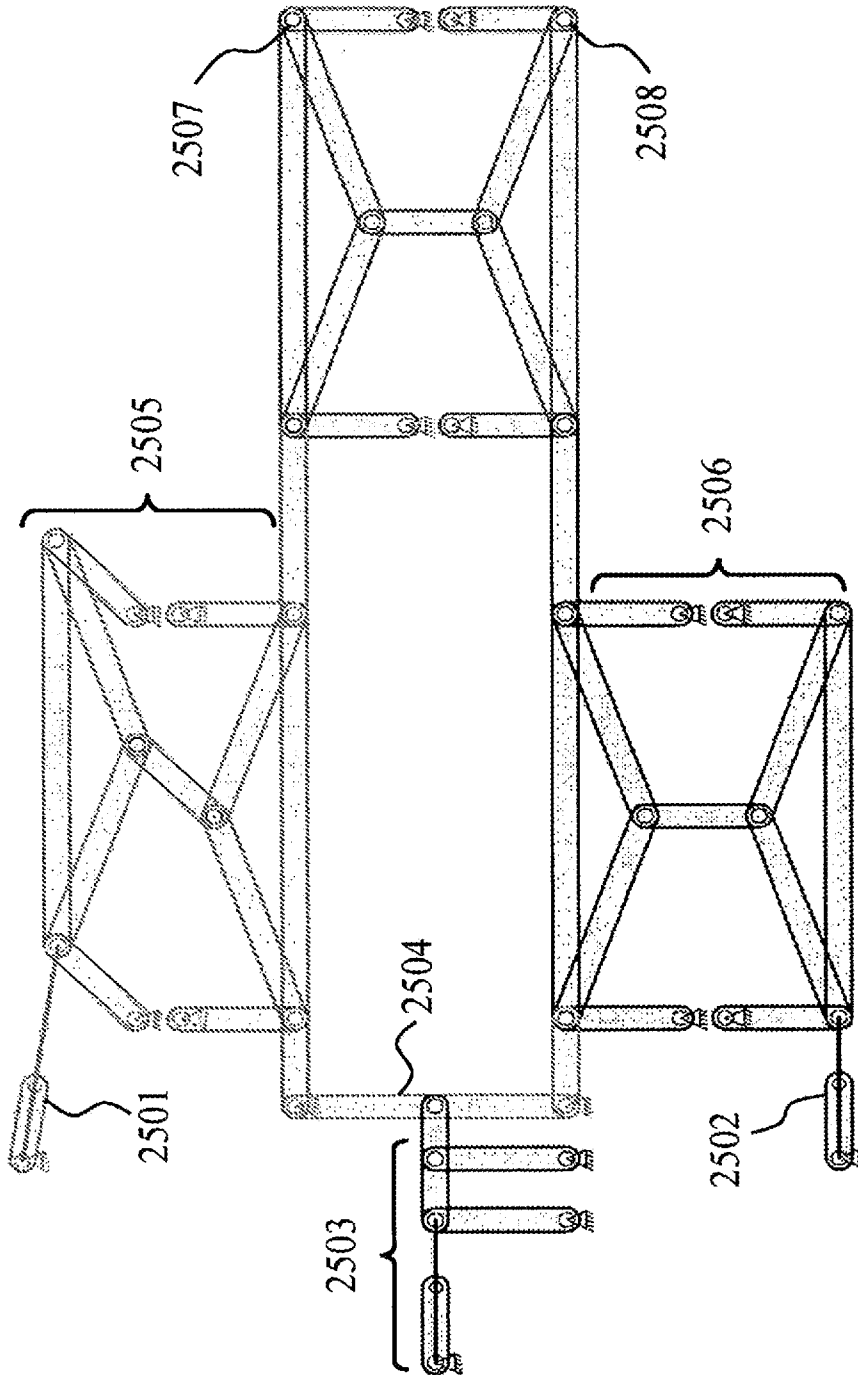


Figura 26

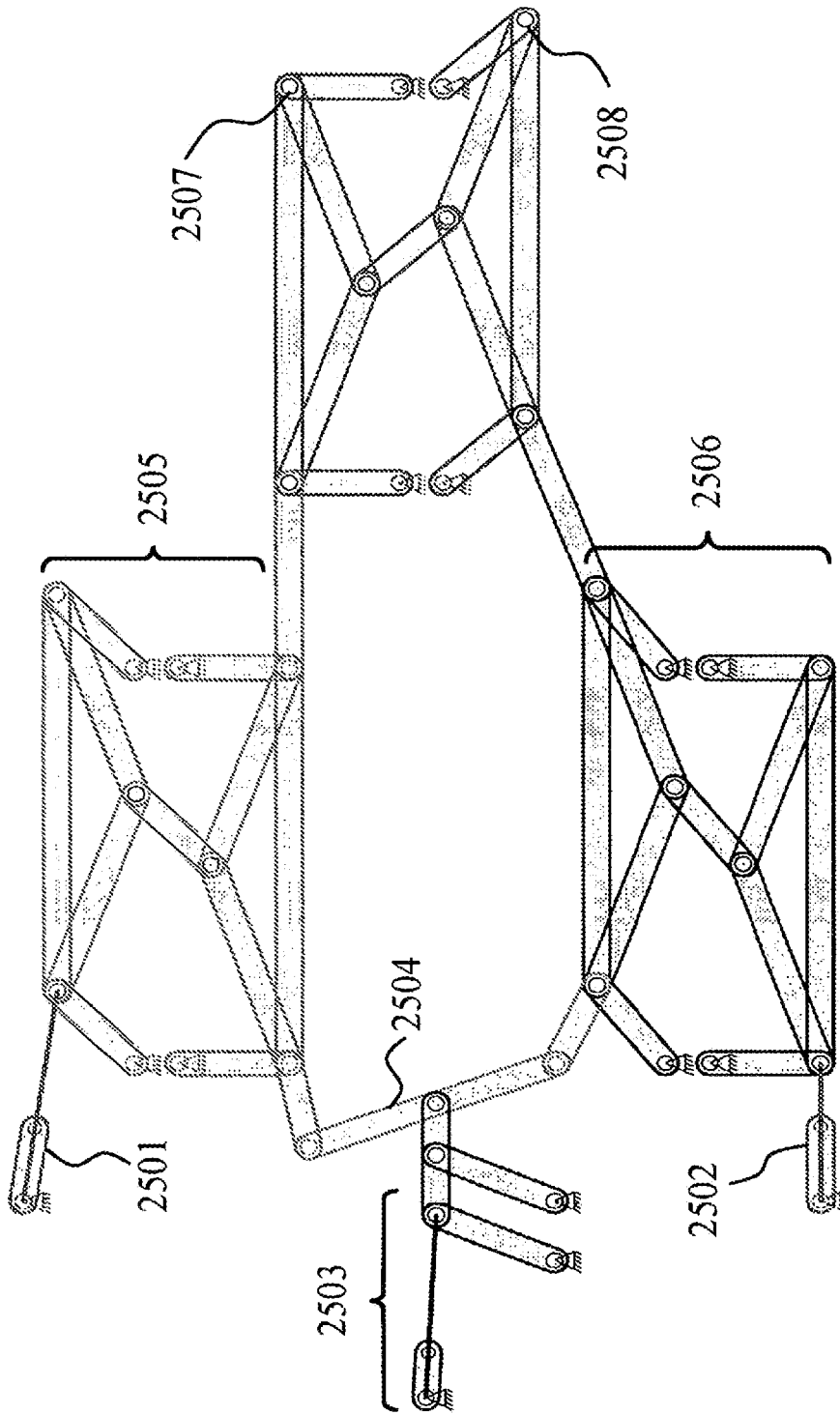


Figura 27

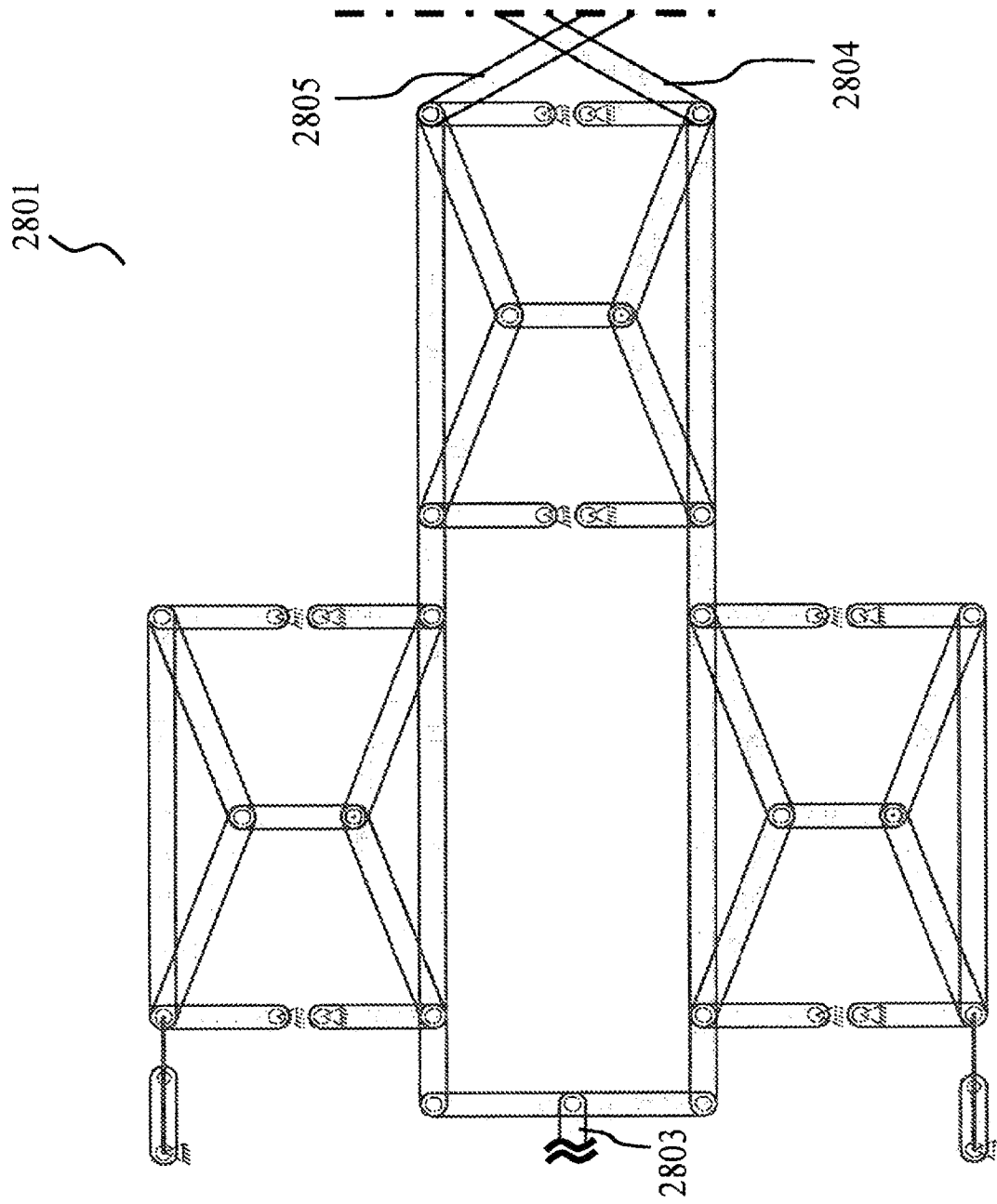


Figure 28a

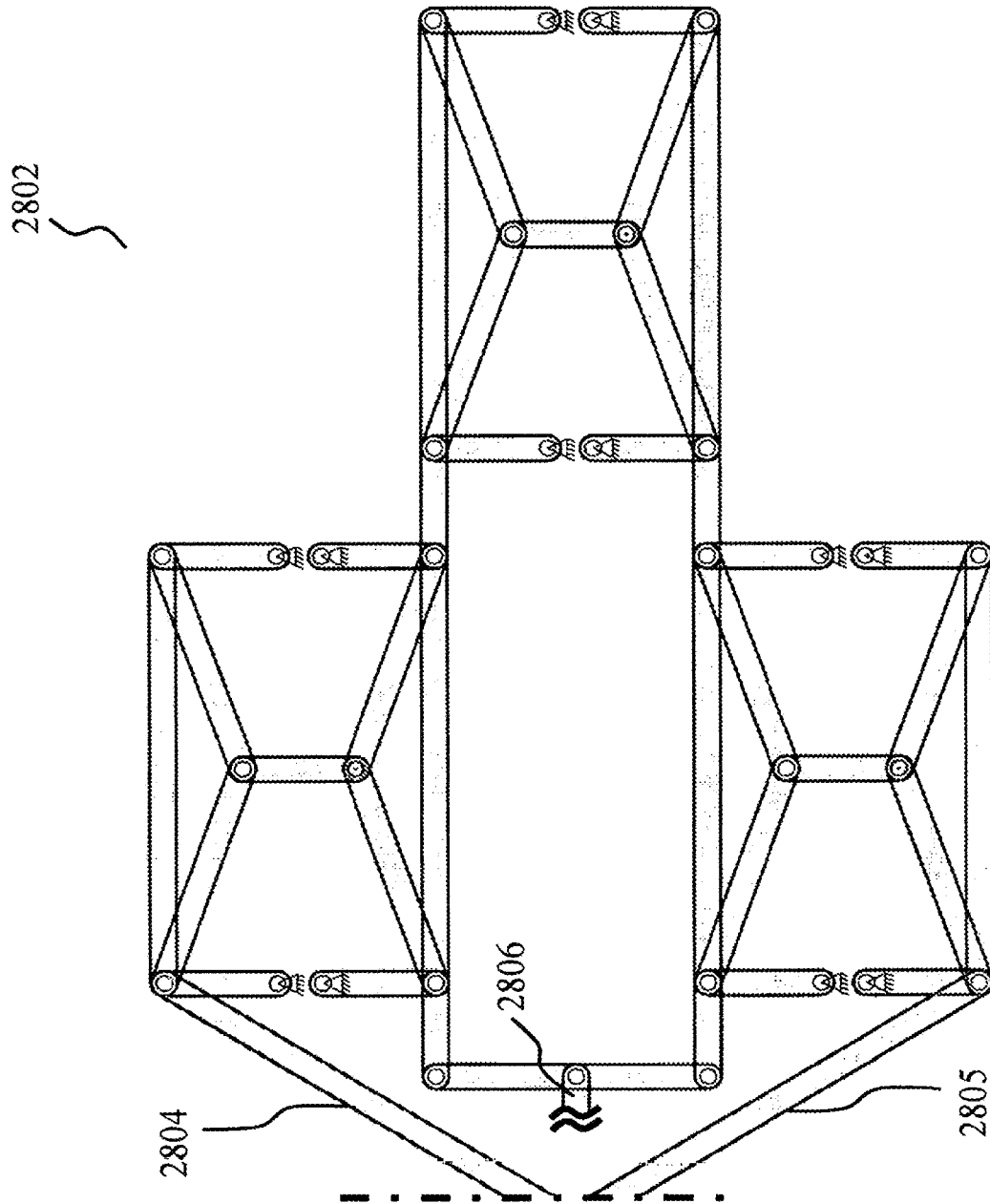


Figura 28b

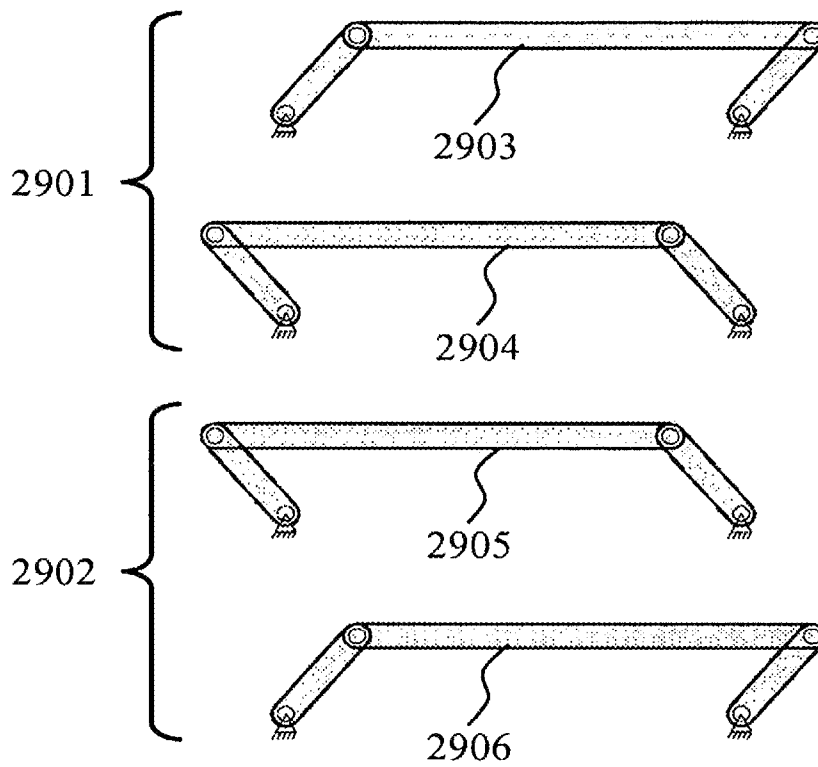


Figura 29

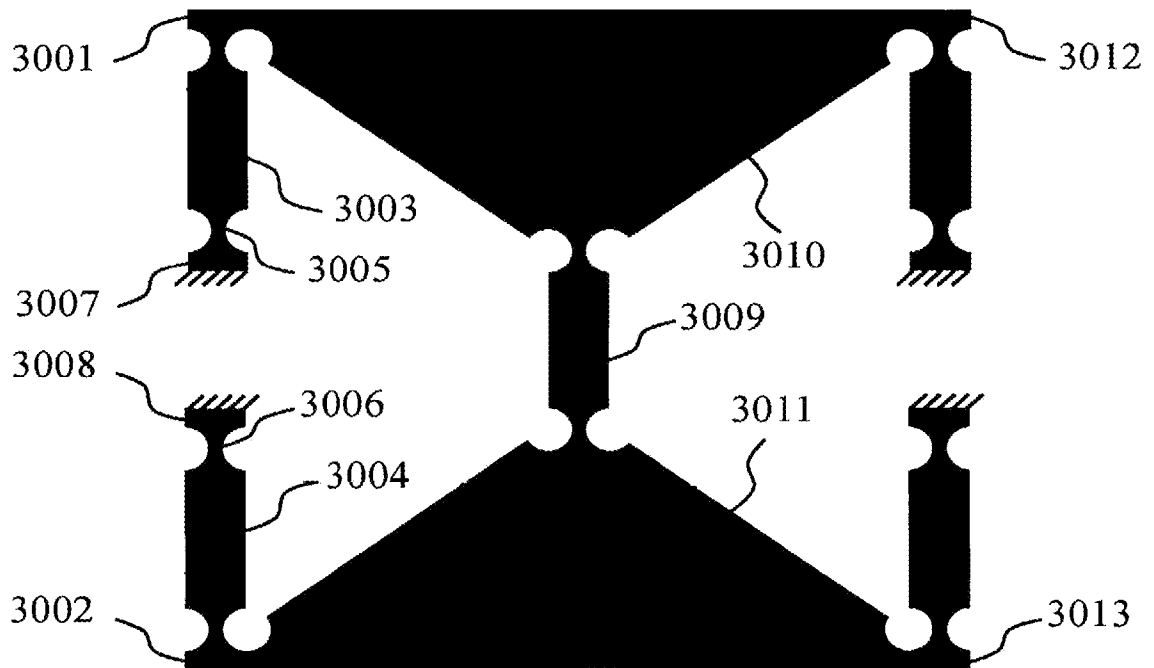


Figura 30

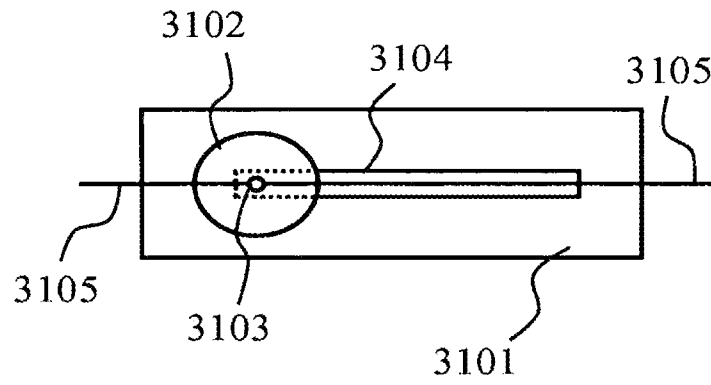


Figura 31

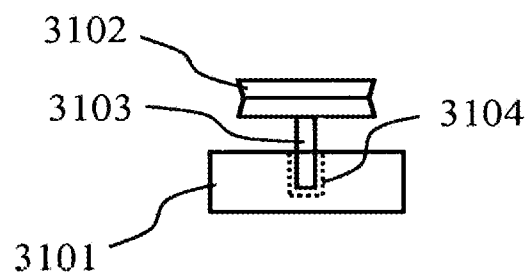


Figura 32

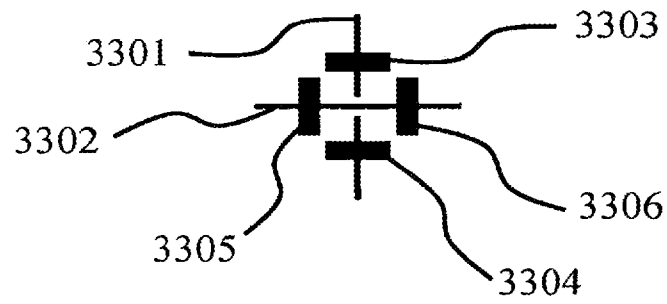


Figura 33a

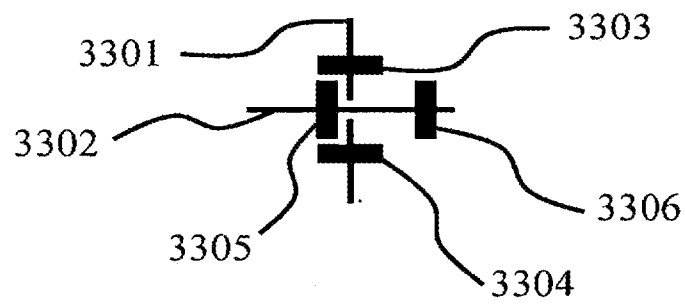


Figura 33b

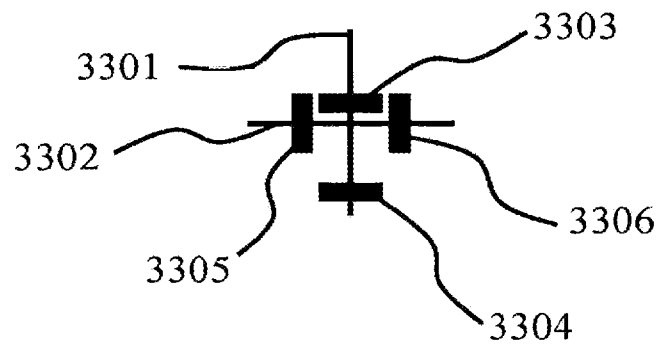


Figura 33c

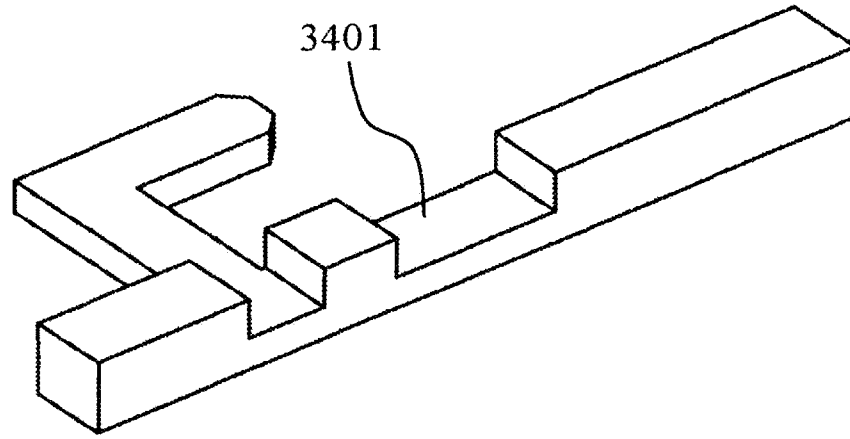


Figura 34

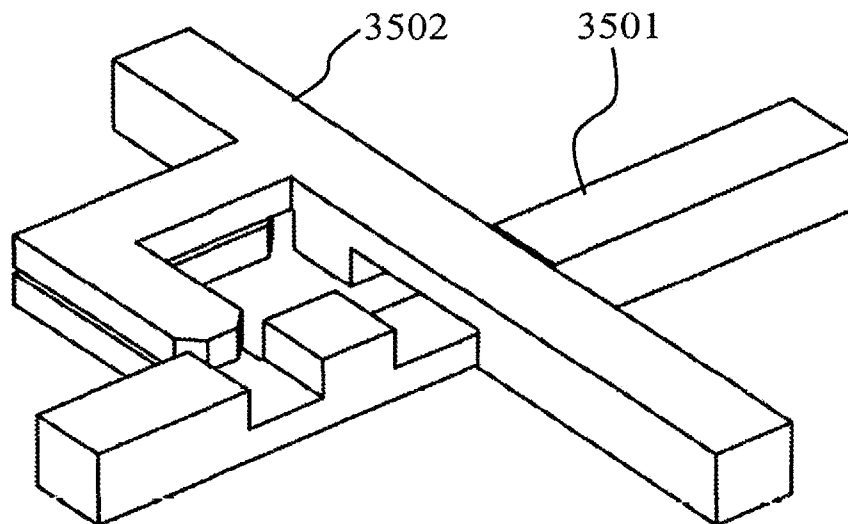


Figura 35

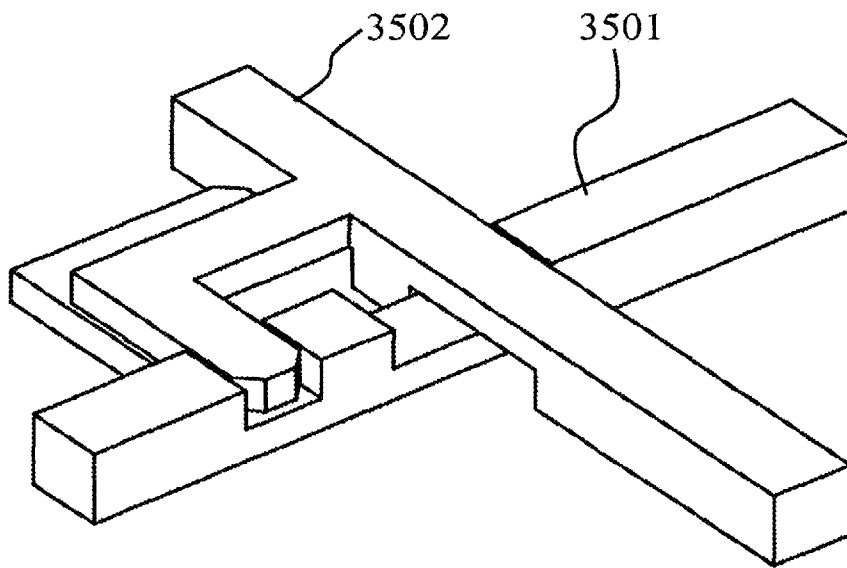


Figura 36

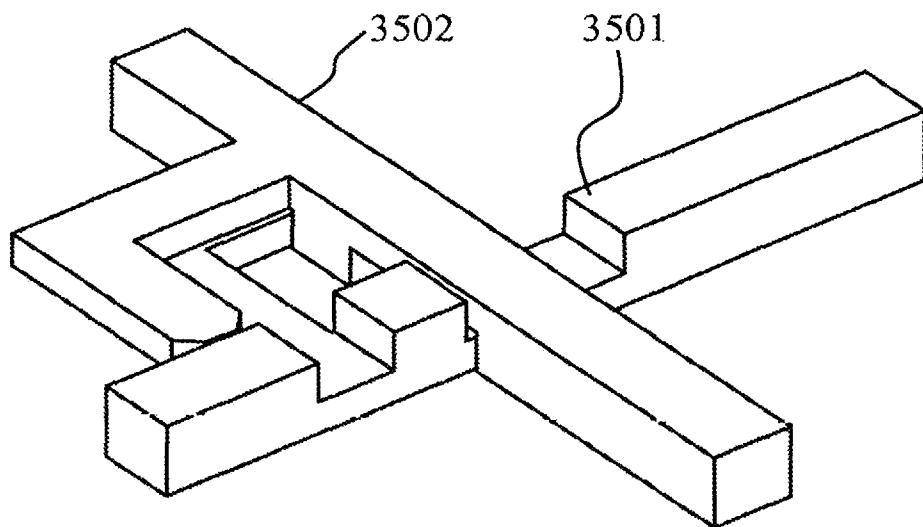


Figura 37

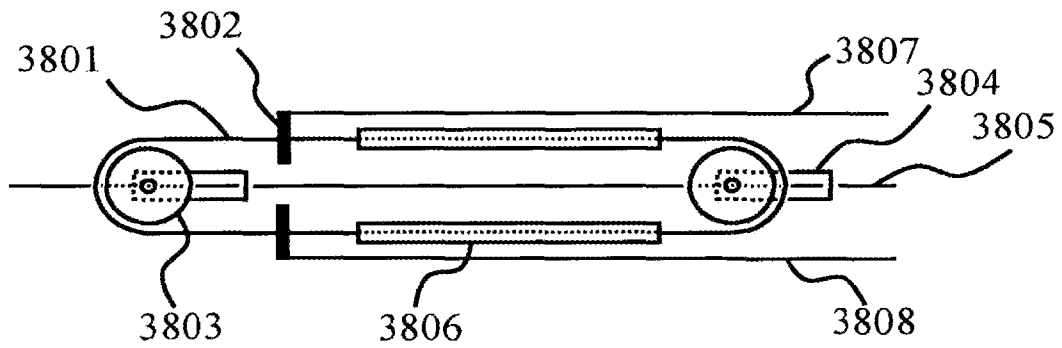


Figura 38

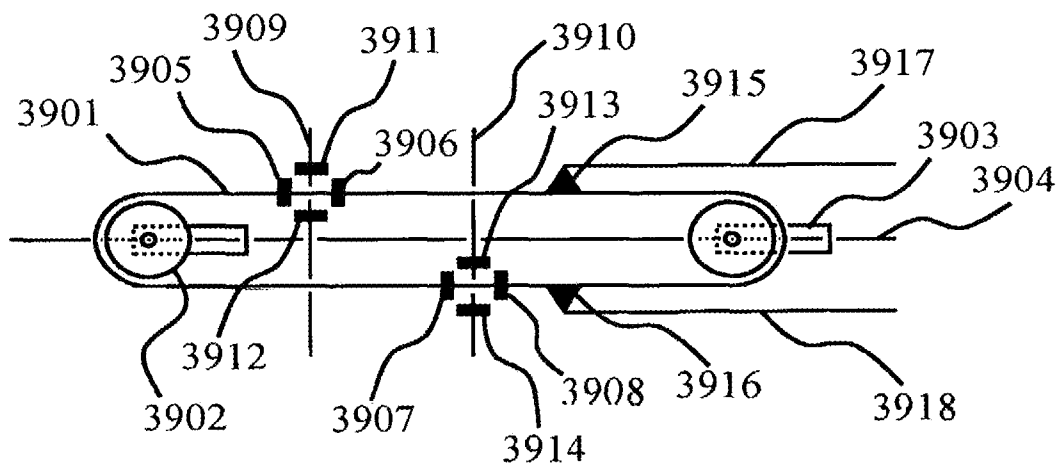


Figura 39

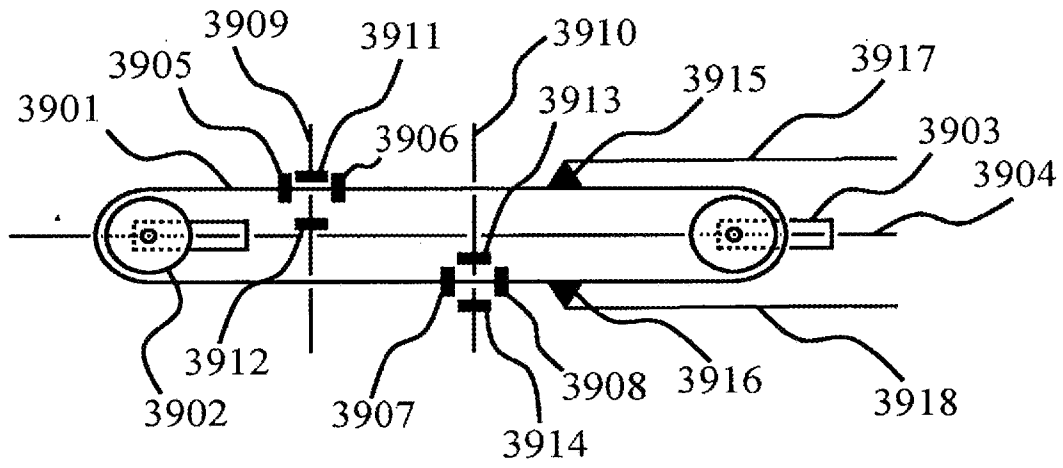


Figura 40

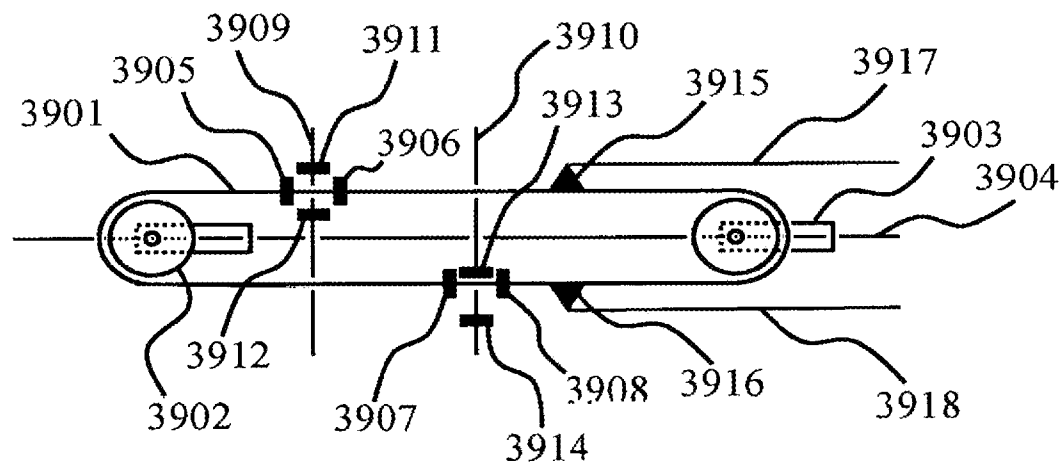


Figura 41

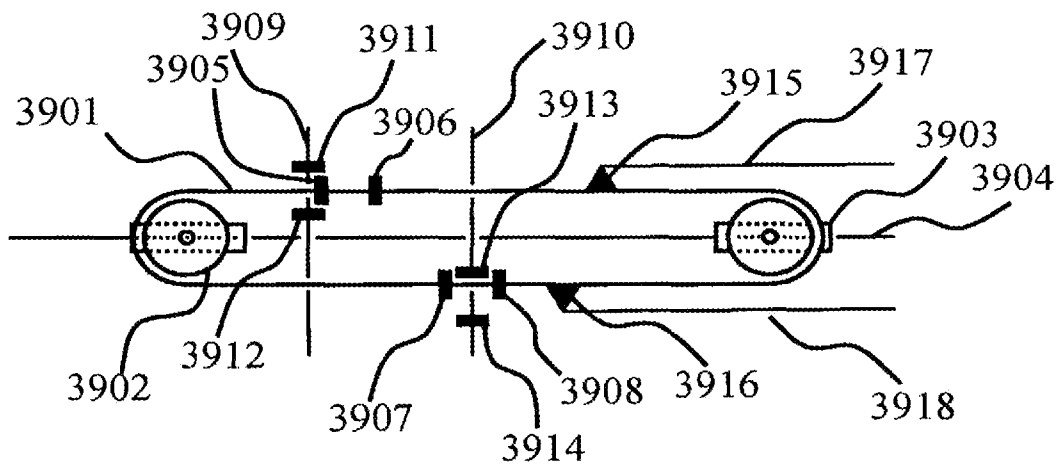


Figura 42