

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 424 244**

51 Int. Cl.:

**B25J 9/16** (2006.01)

**B23K 11/25** (2006.01)

**B23K 11/31** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.03.2010 E 10003623 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2013 EP 2243602**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para regular un manipulador**

30 Prioridad:

**22.04.2009 DE 102009018403**

**14.10.2009 DE 102009049327**

**14.10.2009 DE 102009049329**

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

**30.09.2013**

73 Titular/es:

**KUKA ROBOTER GMBH (100.0%)**

**Zugspitzstrasse 140**

**86165 Augsburg, DE**

72 Inventor/es:

**HAGENAUER, ANDREAS**

74 Agente/Representante:

**AZNÁREZ URBIETA, Pablo**

**ES 2 424 244 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

Procedimiento y dispositivo para regular un manipulador

La presente invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo para regular un manipulador multiaxial, en particular un robot.

- 5 La mayoría de los robots industriales actuales disponen de un control de posición. Para ello, un dispositivo de interpolación genera las posiciones teóricas de articulación que son activadas por los diferentes accionamientos mediante controladores de articulación individuales. Sin embargo, si no se alcanza una posición teórica, por ejemplo debido a obstáculos o a un diseño impreciso del entorno al planificar el trayecto, un control puramente posicional incrementa las fuerzas de accionamiento hasta que o bien se sobrepasen las limitaciones de las magnitudes ajustadas, lo que resulta en una desconexión del control, o bien el robot se acerca de forma forzada a la posición teórica, en este caso dañando eventualmente un obstáculo, un componente, una herramienta o a sí mismo.

- 10 Un ejemplo ilustrativo es la soldadura por puntos con una pinza portaelectrodos: los electrodos de soldadura deben presionarse sobre puntos predeterminados de un componente constructivo y con una presión determinada. Sin embargo, si el componente no está en la posición de soldadura planificada, sino que está desplazado, por ejemplo en la dirección de cierre de la pinza portaelectrodos, un robot regulado únicamente de forma posicional forzaría los electrodos de soldadura a las posiciones predeterminadas y dañaría así el componente y el electrodo, mientras que el otro electrodo posiblemente no haría contacto con el componente. Incluso si no se produjeran daños, aparecerían fuerzas no aceptables durante el proceso de soldadura, fuerzas que pueden reducir la calidad del punto de soldadura y hacer fallar éste.

- 15 Para solucionar estos problemas se conoce el método de proporcionar flexibilidades pasivas determinadas a la estructura del robot, por ejemplo por el llamado "Remote Center of Compliance" (Centro Remoto de Cumplimiento). Sin embargo, debido a las directrices de rigidez y flexibilidad específicas del objetivo, esto no puede aplicarse para diferentes casos. Incluso una conexión activa de una herramienta controlable, por ejemplo una pinza portaelectrodos flotante que se puede ajustar con aire comprimido o servomotores en diferentes posiciones compensadas, debe adaptarse a cada caso aplicativo e implica, igual que la flexibilidad pasiva, un coste adicional en aparatos técnicos.

- 20 Así desde hace tiempo en el campo de la investigación se analiza la regulación de la fuerza, aquí también llamada en general fuerza, los momentos de fuerza antiparalelos, es decir los pares, entendiéndose especialmente como regulación de la fuerza también la llamada regulación de los momentos de fuerza ("KMR"). El concepto de aplicación industrial "FTCtrl" ("Force Roque control") es aquí la división espacial parcial regulada por la posición y la fuerza mediante una matriz de selección, la regulación paralela de posición y fuerza con superposición de las correspondientes magnitudes de ajuste, la regulación de la impedancia a la que se relacionan las posiciones y fuerzas mediante las leyes de las fuerzas, particularmente modelos de fuerza elástica. H.-B. Kuntze, por ejemplo, en "Regelungsalgorithmen für rechnergesteuerte Industrieroboter", Regelungstechnik, ("Algoritmos para robots industriales controlados por computadora", técnica de regulación") 1984, pp. 215-226 o A. Winkler en "Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion", Dissertation (una contribución a la interacción hombre-robot basada en la fuerza), TU Chemnitz, 2006, resumen estos conceptos.

- 25 Sin embargo, la puesta en práctica de este principio habitualmente se encuentra con dificultades. Por ejemplo, regular la fuerza en el espacio cartesiano para que incluya la flexibilidad en una dirección cartesiana requiere, en el caso de la aplicación arriba indicada, esencialmente en la dirección de cierre de la pinza portaelectrodos, un alto coste en cálculos correspondiente al comportamiento de control pasivo. Por otro lado, con el control de la fuerza existe el problema de averiguar en todos los ejes la componente de la fuerza correspondiente que actúa sobre el robot debido al flujo motor, ya que las fuerzas sólo se pueden plantear de forma imprecisa debido a multiplicaciones de engranajes, fricciones y ruidos.

- 30 El documento EP 2000 268 A2 se refiere a un dispositivo de control para un robot en aplicaciones "softcontrol". Se propone realizar el movimiento de al menos un eje en función del movimiento de un eje flexible en un manipulador de ejes regulados en función de la posición y velocidad. Dicho más exactamente, se averigua la posición de corrección de los siguientes ejes  $\delta J_2$ - $\delta J_6$ , que se suma a la posición teórica, en base a los trayectos  $\Delta J_1$ - $\Delta J_6$  previamente calculados y el trayecto  $\delta J_1$  actual registrado del eje guía  $J_1$ . La flexibilidad del eje guía se consigue reduciendo los factores de ganancia del regulador de posición y de velocidad.

- 35 El documento EP 1 905 547 A2 se refiere a un procedimiento "softcontrol" para robots industriales donde se regula de modo flexible todo el robot.

El artículo "Kinematic and dynamic analysis of robot arm" (K. Kosuge, K. Furuta), Proceedings 1985 IEEE ICRA, p. 1039-1044, realiza un análisis cinemático y dinámico de un brazo de robot, utilizándose dichos análisis para diseñar brazos robotizados.

- 55 Por tanto, el objetivo de la presente invención es perfeccionar el comportamiento de un manipulador en la práctica.

Este objetivo se alcanza mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1. La reivindicación 13 protege un dispositivo de control, la reivindicación 14 ó 15 un programa de ordenador o un producto tipo programa de ordenador, en particular un soporte para datos o un medio de memoria, para realizar un procedimiento según la reivindicación 1. Las reivindicaciones dependientes se refieren a desarrollos ventajosos.

5 La presente invención se basa en la siguiente reflexión: un movimiento flexible en el espacio cartesiano o de trabajo se corresponde con un movimiento en uno o varios ejes de movimiento del manipulador, por ejemplo articulaciones giratorias o ejes lineales del mismo. Se determina al menos uno de estos ejes como eje guía y se regula de modo flexible. Otros ejes, preferentemente el resto de los ejes, se regulan de forma rígido, sin embargo determinándose un valor teórico en base a un valor real del/de los eje(s) guía. El movimiento flexible en el espacio cartesiano se  
10 parametriza, por así decirlo, mediante el/los eje/s guía. Entonces se puede representar, por un lado, la flexibilidad debida a la regulación flexible de este/estos eje/ejes guía y, por otro lado, se puede asegurar el movimiento flexible deseado en el espacio cartesiano mediante las regulaciones rígidas de los demás ejes que siguen al eje flexible guía.

Ventajosamente, el concepto según la invención permite utilizar reguladores sencillos, robustos y eficientes para el eje  
15 guía y los demás ejes y puede ponerse en práctica de modo sencillo y fiable en comparación con los principios teóricos, más complicados.

Bajo el concepto regulación flexible se entiende aquí, en particular, una regulación que provoca un movimiento, especialmente una desviación, por el efecto de una fuerza, por ejemplo una fuerza guía o una fuerza de contacto, cuando se encuentra un obstáculo. Preferentemente esta desviación se produce en función de la magnitud y/o de la  
20 dirección de la fuerza. Preferentemente, la regulación flexible está configurada como una regulación de articulación única del correspondiente eje guía.

En particular, la regulación flexible puede diseñarse como regulación de fuerza. Para ello, por ejemplo puede registrarse el efecto de una fuerza directamente mediante un sensor de fuerza o de fuerza-momento, preferentemente en una brida de herramienta del manipulador. Adicional o alternativamente, es posible registrarlo en base a una fuerza de reacción con un accionamiento del manipulador, por ejemplo, con un sensor de fuerza o fuerza-momento dispuesto en el mismo.  
25 La fuerza de reacción también se puede averiguar en base a las fuerzas que debe generar el accionamiento además de las fuerzas que aparecen con un recorrido libre de contacto y de fuerzas, por ejemplo, además de las fuerzas estáticas de parada o de las fuerzas dinámicas centrífugas y de aceleración. En particular, tales fuerzas pueden averiguarse en base a un valor de corriente de un motor de accionamiento eléctrico. Es decir, la corriente del motor generada para regular el movimiento es, una vez eliminados los efectos gravitatorios, inerciales y de fricción, esencialmente lineal a las  
30 fuerzas reactivas en los distintos ejes. Queremos señalar de nuevo que también aquí se designa el par en general como fuerza.

La regulación flexible también puede diseñarse como una regulación de fuerza indirecta, en particular como regulación de impedancia. De la misma manera también puede diseñarse como regulación de fuerza directa, en particular como  
35 regulación paralela de fuerza y posición, donde se han tenido en cuenta tanto las desviaciones entre las fuerzas teóricas y reales como aquellas entre las posiciones teóricas y reales, por ejemplo superponiéndose las correspondientes magnitudes de ajuste.

Una posibilidad sencilla para regular una fuerza es limitar las fuerzas de accionamiento del eje guía. En principio, éste es regulado posicionalmente, no pudiendo su fuerza de accionamiento sobrepasar un valor límite predeterminado, por ejemplo limitando la corriente teórica máxima del motor en un circuito de control de corriente de un regulador en  
40 cascada, también en caso de grandes desviaciones entre los valores teórico y real. Un eje con regulación de fuerza de este tipo intenta llegar a la posición teórica siempre que esté sometido a una resistencia que no exceda el valor límite determinado. Si la resistencia sobrepasa este valor límite, por ejemplo debido a la colisión con un obstáculo, el eje se puede desplazar y sólo opone en este caso una fuerza correspondiente al valor límite, es decir tiene una regulación flexible.

Correspondientemente se entiende como regulación rígida se entiende aquí, en particular, una regulación que en principio se centra en una posición teórica predeterminada independientemente de las fuerzas opuestas o que no provoca ningún movimiento de desviación bajo una fuerza, por ejemplo una fuerza guía o una fuerza de contacto, al  
45 llegar a un obstáculo. Naturalmente se pueden tener en cuenta aquí límites superiores para las fuerzas de regulación necesarias en este caso con el fin de evitar daños. Preferentemente, la regulación rígida está configurada como regulación de articulación única de los correspondientes otros ejes.  
50

En especial, la regulación rígida puede estar configurada como una regulación posicional (pura). Con regulación posicional o de posición se entiende aquí, en particular, también una regulación donde se determina, por ejemplo en forma de regulación en cascada, preferentemente con control previo de la velocidad y/o aceleración, una magnitud de  
55 ajuste, por ejemplo la corriente del motor, en base a la diferencia entre las posiciones teóricas y reales, sus integrales y/o derivadas temporales, por ejemplo una o múltiples regulaciones proporcionales (P), diferenciales (D) y/o integrales (I) (P, PD, PI, PID).

En una realización preferente, se predetermina una fuerza de la que tiene que desviarse el manipulador de manera flexible y/o una línea de acción a lo largo de la cual el manipulador debe ceder el paso de modo flexible, en un espacio cartesiano o de trabajo, por ejemplo mediante los vectores correspondientes en un sistema inercial estable.

5 La fuerza predeterminada puede ser, por ejemplo, la fuerza de contacto que el manipulador debe ejercer a lo largo de la línea de acción, como puede ser la presión de unas pinzas portaelectrodos en su dirección de cierre, y frente a la que ha de desviarse a lo largo de la línea de acción en caso de sobrepasar este valor.

10 Una línea de acción predeterminada puede ser, por ejemplo, una secuencia de posiciones y orientaciones del TCP. En este caso puede predeterminarse, por ejemplo, mediante un vector parametrizado de seis dimensiones, con tres coordenadas de posición y tres coordenadas de ángulo en el espacio cartesiano. De igual forma, también son posibles líneas de acción que sólo definen, por ejemplo, las posiciones o sólo la orientación del TCP y pueden, por tanto, predeterminarse mediante un vector tridimensional parametrizado. Por otro lado, también es posible especificar una flexibilidad espacial más compleja, por ejemplo a lo largo de un plano o de otra hipersuperficie o dentro de un hiperespacio en la zona de las posiciones y/u orientaciones o en el espacio de configuración de las coordenadas de articulación. Todas estas rectas, curvas, superficies, hipersuperficies e hiperespacios se denominan en los que sigue, para mayor simplicidad, en general, líneas de acción. Así, especificando una línea de acción en el sentido de la presente invención se puede predeterminar por ejemplo un plano en el espacio cartesiano donde el TCP del manipulador debe desviarse de modo flexible, manteniendo o no la orientación, o una esfera dentro de la cual el TCP debe permanecer en el caso de una desviación flexible.

20 Se pueden determinar uno o varios ejes del manipulador como ejes guía según la posibilidad de control a lo largo de una línea de acción de este tipo y/o en base a la posibilidad de observación de esta fuerza. Como ya se ha explicado en la introducción, una fuerza o un movimiento a lo largo de una línea de acción en el espacio cartesiano provoca las correspondientes componentes de la fuerza o de movimiento en los diferentes ejes del manipulador. La magnitud de estas componentes o de los movimientos puede constituir, por ejemplo, una medida de control a lo largo de la línea de acción o de observación de la fuerza. Es decir, se puede observar mejor en este eje la fuerza que graba en un accionamiento un componente mayor debido a la cinemática del manipulador, particularmente debido a los brazos efectivos de palanca, multiplicaciones de engranajes etc. Si al moverse el accionamiento del manipulador se desplaza en un recorrido mayor a lo largo de la línea de acción, esta línea de acción puede controlarse mejor mediante este eje. Si, por tanto, se elige un eje guía teniendo en cuenta el control y/o la observación, por ejemplo como suma ponderada o función de penalización, se puede parametrizar de forma especialmente adecuada mediante este eje guía la fuerza frente a la cual el manipulador debe ceder, o la línea de acción a lo largo de la cual el manipulador debe ceder.

Puesto que las componentes de la fuerza o los movimientos, y con ello la capacidad de control u observación, pueden cambiar según la colocación actual del manipulador, en una realización preferente se prevé seleccionar diferentes ejes guía en función de la postura del manipulador.

35 En particular, para evaluar las componentes de la fuerza o del movimiento y, por tanto la capacidad de control u observación, en una realización preferente se transforma la fuerza y/o la línea de acción del espacio cartesiano o de trabajo en un espacio articulado que se define por un rango de valores de los diferentes ejes.

40 Esta transformación también depende de la colocación del manipulador. En todo caso se puede aproximar la transformación por un desarrollo de TAYLOR lineal en el rango de pequeñas modificaciones de una postura de referencia. Puesto que una transformación lineal de este tipo se puede cambiar eficientemente con técnicas aritméticas, en una realización preferente se linealiza localmente la transformación, especialmente para una determinada postura del manipulador. Debido a que la linealización normalmente sólo se aproxima adecuadamente de forma local, es posible llevara a cabo para diferentes posturas. Mediante una conmutación o interpolación de las correspondientes transformaciones lineales, también se puede adaptar la transformación para campos de trabajo del manipulador mayores.

45 En una realización preferente, el valor teórico de los demás ejes depende linealmente de un valor real del/de los eje/s guía. La línea de acción cartesiana se transforma en una función lineal con las coordenadas de articulación, en particular en una transformación linealizada, de manera que una parametrización con las coordenadas de articulación del/de los eje/ejes guía conduce a una función lineal en los demás ejes. Sin embargo, de la misma manera se pueden elegir funciones no lineales entre valores reales del eje/de los ejes guía y valores teóricos de los demás ejes. Éstas pueden almacenarse en forma de tabla, pudiendo interpolarse entre los valores de las tablas. También son adecuadas transformaciones particularmente favorecidas por la forma de la línea de acción predeterminada por la aplicación, en espacios funcionales adecuados de dimensiones finitas como son polinomios, splines, series finitas de Fourier, etc.

55 En una realización preferente en primer lugar se determinan varias líneas posibles de acción. Por ejemplo, se pueden determinar como otras líneas de acción posibles, además de una recta o un plano en el espacio cartesiano, a lo largo de los cuales debe ceder el TCP manteniendo su orientación, rectas colineales o planos coplanares en los cuales debe ceder el TCP modificando su orientación. Entonces se puede seleccionar y predeterminar como línea de acción una de estas líneas de acción, preferentemente en base a la capacidad de control a lo largo de la línea de acción y/o en base a la capacidad de observación de la fuerza, línea de acción a lo largo de la cual el manipulador debe desviarse flexiblemente. Si por ejemplo se puede controlar mejor en un eje un movimiento de desviación a lo largo de una recta,

donde cambia la orientación del TCP, en una realización preferente se elige este eje como eje guía, por ejemplo mediante un optimizador.

5 Preferentemente, el número de ejes guía se corresponde con el número de grados de libertad de flexibilidad predeterminada o con la dimensión de la línea de acción que describe esta flexibilidad. Se trata de una línea de acción unidimensional si el TCP del manipulador debe ser flexible, por ejemplo manteniendo la orientación a lo largo de una recta en el espacio cartesiano, teniendo el TCP un grado de libertad. Entonces se puede elegir un eje de movimiento como eje guía y los demás ejes pueden parametrizarse con éste. Si, por el contrario, el TCP debe ser flexible, manteniendo su orientación a lo largo de un plano en el espacio cartesiano, se trata de una línea de acción bidimensional o una hipersuperficie, teniendo el TCP dos grados de libertad. Entonces se pueden elegir dos ejes de movimiento como ejes guía y los demás ejes pueden parametrizarse con los primeros.

10 En algunos casos el manipulador debe ser flexible sólo por segmentos. Así, por ejemplo, un robot industrial debe realizar de modo rígido y con gran precisión recorridos sin contacto, por ejemplo para desplazarse hasta una postura inicial, y ser flexible en una dirección predeterminada sólo en caso de contacto con el entorno, por ejemplo por cierre de unas pinzas portaelectrodos. Por esta razón, en una realización preferente, se conmuta opcionalmente entre una regulación flexible de al menos un eje guía y una regulación rígida de todos los ejes de movimiento.

Otras ventajas y características resultan de las reivindicaciones dependientes y de los ejemplos de realización. En las figuras, parcialmente en forma de esquema:

Fig. 1: robot con un sistema de control según una realización de la presente invención y

20 Fig. 2: desarrollo de un procedimiento según una realización de la presente invención mediante el sistema de control de la Fig. 1.

La Fig. 1 muestra un robot de brazos articulados 1 de seis ejes en una posición básica en la que sus seis ángulos de eje o de articulación  $q_1, q_2 \dots q_6$  tienen el valor cero. Para simplificar, suponemos que en los ejes 1, 4 y 6 no se produce movimiento, de manera que a continuación sólo se considera un movimiento plano y las coordenadas de articulación  $q_2, q_3$  y  $q_5$  que determinan las correspondientes posiciones de giro de los motores de accionamiento mediante las correspondientes multiplicaciones de engranajes. En este caso el vector  $x$  del sistema de referencia de herramienta TCP de una pinza portaelectrodos 2, que debe soldar por puntos dos chapas 3, con las distancias entre ejes  $x_1 \dots y_6$  de la Fig. 1 en el sistema inercial de base fija  $I$  es:

$$x = x(q) = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1 - y_2 \cdot \sin(q_2) - x_3 \cdot \cos(q_2 + q_3) + y_6 \cdot \sin(q_2 + q_3 + q_5) \\ y_1 + y_2 \cdot \cos(q_2) - x_3 \cdot \sin(q_2 + q_3) - y_6 \cdot \cos(q_2 + q_3 + q_5) \\ q_2 + q_3 + q_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

30 con los componentes  $r_x, r_y$  del radiovector  $r$  hacia el TCP y el ángulo de EULER  $\varphi$  alrededor del eje Z. La matriz Jacobiana muestra localmente la postura base representada en la Fig. 1:

$$J(q = 0) = \frac{\partial x}{\partial q} \Big|_{q=0} = \begin{bmatrix} -y_2 + y_6 & y_6 & y_6 \\ -x_3 & -x_3 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2).$$

El robot 1 debe ser flexible en la dirección  $y$  del sistema inercial, de manera que al acercar las chapas 3 la pinza portaelectrodos 2 pueda centrarse con los electrodos de soldadura en esta dirección. Para ello, el TCP del robot debe aportar como máximo, a lo largo de la recta cartesiana

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -x_1 - x_3 \\ y_1 + y_2 - y_6 \\ 0 \end{bmatrix}}_j + \lambda \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_k \quad (3)$$

una fuerza  $F_{max}$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ F_{max} \\ 0 \end{bmatrix}}_{F_{max}} \quad (4)$$

Esta recta  $s + \lambda k$  y la fuerza de contacto máxima  $F_{max}$  pueden transformarse, según (2) a (4), en las identidades  $Q = J^T * F$  y  $J * dq = dx$  localmente alrededor del punto  $s$  en el espacio de las coordenadas de articulación  $q = [q_2, q_3, q_5]^T$ :

$$s + \lambda \cdot k \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ -\lambda/x_3 \\ \lambda/x_3 \end{bmatrix} =: \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \lambda' \\ -\lambda' \end{bmatrix}}_{q_i} \quad (5)$$

$$F_{max} \rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} -x_3 \cdot F_{max} \\ -x_3 \cdot F_{max} \\ 0 \end{bmatrix}}_0$$

- 5 La fuerza  $F$  a lo largo de la recta  $s + \lambda k$  no genera en la articulación 5 ningún par ( $Q_5=0$ ) debido al brazo articulado que desaparece, de manera que el quinto eje no es adecuado para regular la fuerza-momento debido a que es difícil observarlo. Por otro lado, no se desplaza el segundo eje, de manera que el tercer eje no se puede controlar mejor en cuanto a la línea de acción  $s + \lambda k$ .
- 10 Por ello, se elige el tercer eje como eje guía y la recta cartesiana a lo largo de la cual el robot 1 ha de ser flexible se parametriza con el ángulo  $q_3$  de articulación. Así se consigue, por un lado, una magnitud de la dirección lo suficientemente grande. Por otro lado, la fuerza de contacto se puede registrar adecuadamente en base al par generado en el motor de accionamiento del tercer eje.
- 15 Si el robot 1 se ha desplazado con su TCP hasta la postura de inicio representada en la Fig. 1, entonces sólo el tercer eje se regula de modo flexible. Esto se puede realizar, por ejemplo, limitando su corriente teórica en una regulación posicional de cascada que intenta mantener como posición teórica la posición inicial con  $q_{3s} = 0$ , de manera que el par generado en la toma de fuerza del engranaje se desvía del par para compensar las fuerzas debidas a la masa en como máximo  $\pm x_3 \cdot F_{max}$ , es decir el robot contrapone al movimiento de perturbación desde la postura de inicio en este eje un par máximo  $x_3 \cdot F_{max}$ . Naturalmente también son posibles otras regulaciones de flexibilidad del tercer eje, por ejemplo una regulación paralela fuerza-posición donde se superponen los valores de ajuste de los reguladores de fuerza y posición o una regulación en impedancia. El valor real de la fuerza que actúa sobre el TCP a lo largo de la recta cartesiana predeterminada puede averiguarse, por ejemplo, a partir del par que provoca la fuerza sobre el accionamiento del tercer eje y, por ejemplo, de la corriente del motor, mediante un correspondiente sensor de fuerza o fuerza-momento, por ejemplo en la brida de herramienta del robot 1, o de deformaciones elásticas, por ejemplo, de un brazo.
- 25 Los demás ejes se regulan de modo rígido o posicional en el ejemplo de realización, en particular en el segundo y quinto eje. Con ello se puede registrar, por ejemplo, un ángulo de articulación  $q_2$  ó  $q_5$  y/o una velocidad de ángulo de articulación  $dq_2/dt$  ó  $dq_5/dt$  con ayuda de un generador tacométrico, un resolutor o un codificador rotatorio incremental, se puede retornar y realizar su seguimiento en una regulación de cascada de corriente de velocidad posicional según un valor teórico  $q_{2s}$  ó  $q_{5s}$ .
- 30 Este valor teórico para el segundo y quinto eje con regulación posicional se determina, según la invención, en base al valor real  $q_{3mess}$  del tercer eje regulado de modo flexible. Según (5) los valores teóricos  $q_{2s}$  y  $q_{5s}$  pueden predeterminarse, por ejemplo, como

$$\begin{aligned} q_{2s} &= 0 \cdot q_{3mess}, \\ q_{5s} &= -q_{3mess} \end{aligned} \quad (6)$$

- Si ahora, partiendo de la posición inicial representada en la Fig. 1, el robot 1 cierra sus pinzas portaelectrodos 2 para soldar la chapa 3 por puntos, puede producirse, por ejemplo debido a un apoyo impreciso de la chapa 3, un posicionamiento impreciso de su TCP, o debido a las tolerancias de espesor de la chapa, que ésta no esté situada en el punto de trabajo TCP de las pinzas portaelectrodos 2. Así, al cerrarse las pinzas se genera una fuerza reactiva  $F$  a lo largo de la recta cartesiana  $s + \lambda k$ , es decir en la dirección de cierre de las pinzas portaelectrodos 2.
- El robot puede desviarse en esta dirección debido a la regulación flexible del tercer eje, ya que, tan pronto como el par de giro aplicado en el tercer eje por la fuerza reactiva  $F$  sobrepasa el valor admisible  $\pm x3F_{\max}$ , ya no aumenta más la corriente teórica en el controlador del motor a pesar de la desviación posicional y el robot 1 se desvía bajo la fuerza reactiva de su tercer eje.
- Este movimiento de desviación, es decir los valores reales medidos del ángulo de articulación  $q_{3_{\text{mess}}}$ , conduce, a causa de sus regulaciones rígidas posicionales, a un correspondiente seguimiento en el segundo y quinto eje. Éstos siguen entonces el movimiento de desviación del tercer eje, de manera que el TCP se desplaza a lo largo de la recta cartesiana  $s + \lambda k$ , es decir en la dirección de cierre de las pinzas portaelectrodos 2. De esta manera se centran las pinzas portaelectrodos 2 con ayuda de reguladores sencillos, robustos y rápidos.
- Como se puede observar en el ejemplo de realización, en general el TCP se desplaza de forma linealmente dependiente de los valores teóricos de los ejes de regulación posicional del valor teórico de los ejes guía (6) sólo aproximadamente a lo largo de una recta en el espacio cartesiano o de trabajo. Sin embargo, esto ya puede ser suficiente en el caso de aplicación de la soldadura por puntos con los correspondientes recorridos pequeños de aproximación, de normalmente 1 a 2 cm.
- El procedimiento según la invención también puede utilizarse para recorridos mayores, por ejemplo mediante la repetición de la linealización, en particular la evaluación de la matriz *Jacobiana* de (2), por segmentos o para diferentes posturas del robot 1 y ajustes al cambio de la cinemática. En caso dado, aquí también se puede cambiar el eje guía. Otra posibilidad para recorridos mayores es representar la línea de acción deseada en el espacio cartesiano con una aproximación de orden superior en el espacio de articulación, en lugar de la aproximación de la línea de acción por una recta en el espacio de articulación, que se parametriza mediante el eje guía (es decir la linealización mostrada en el ejemplo de realización), donde de nuevo habría de elegirse, de preferencia, una representación en la que los ejes que siguen aparecen como una función del eje guía.
- La Fig. 2 representa una regulación correspondiente que puede implantarse, por ejemplo, en el control del robot dispuesto en un armario de mando 4.
- En un primer paso S10 se predeterminan, preferentemente previamente *offline*, la recta cartesiana  $s + \lambda k$  en el espacio de trabajo a lo largo de la cual el robot debe ser flexible, así como los parámetros de regulación, por ejemplo la fuerza máxima  $F_{\max}$  a partir de la cual el robot debe desviarse.
- Entonces se averiguan en un paso S20, en caso dado para varias posturas, y preferentemente se linealizan los ángulos correspondientes de articulación  $q_k$  y los pares  $Q$ . En base a la posibilidad de observación de una fuerza a lo largo de la recta cartesiana, es decir de la magnitud del par provocado por ésta en el motor de accionamiento, y a la posibilidad de control, es decir al tamaño del recorrido de desplazamiento del correspondiente eje al desplazarse a lo largo de la recta cartesiana, se elige un eje guía, preferentemente el tercer eje.
- El robot 1 se aproxima con una regulación posicional pura de todos los ejes 2, 3, 5 a su postura de inicio. Para ello, se indica en el paso S30 una regulación en cascada para los diferentes ejes  $i = 2, 3$  y 5 con un regulador posicional proporcional, un control previo de velocidad, un regulador PID y un regulador de corriente o de motor integral-proporcional.
- Se conmuta a la regulación según la invención (S40: "J") cuando el robot 1 ha alcanzado su posición de inicio.
- Ahora se regula el tercer eje de modo flexible. Para ello, se indica en el paso S50 una limitación de corriente teórica 10. Los demás ejes  $i = 2, 5$  se regulan posicionalmente, donde sin embargo sus valores teóricos ya no resultan del interpolador del control del robot 4, sino del valor real del tercer eje como también se ha indicado en el paso S50 por el elemento 20.
- La regulación retorna a una pura regulación posicional para todos los ejes (S40: "N") una vez terminado el proceso de soldadura por puntos. Preferentemente entonces se realiza un ajuste del valor teórico y real de las posiciones de los ejes.
- En el ejemplo de realización dado, el TCP conserva su orientación local con ( $\varphi = q_2 + q_3 + q_5 = 0$ ) con una flexibilidad a lo largo de la recta  $s + \lambda k$ . Si se renuncia a este requisito, debido a la supresión del tercer renglón en (2), se puede parametrizar otra línea de acción, por ejemplo según:

$$\begin{aligned}
 q3_s &= -q2_{mess}, \\
 q5_s &= \frac{y2}{y6} \cdot q2_{mess}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Si un eje muestra en este sentido una mejor posibilidad de control y/o de observación que el tercer eje (6), es posible predeterminar, por ejemplo mediante un optimizador que tiene en cuenta la controlabilidad y observabilidad como criterios de calidad, este eje en (7), por ejemplo el segundo eje, como eje guía y la línea de acción según (7).

#### 5 *Lista de referencias*

- 1 Robot
- 2 Pinzas portaelectrodos
- 3 Chapa
- 4 Armario de mando

10

q1...q6 ángulo de articulación

I sistema inercial

TCP Tool Center Point (sistema de referencia de herramienta)

x1...y6 distancias entre ejes

15



**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para regular un manipulador de múltiples ejes, en particular un robot (1), que comprende los pasos de:
  - 5 regulaci3n flexible (S50) de al menos un eje gu3a; y
  - regulaci3n r3gida (S50) de al menos otro eje;
  - caracterizado porque
  - se determina un valor te3rico ( $q_{2s}$ ,  $q_{5s}$ ) del al menos otro eje en base a un valor real ( $q_{3mess}$ ) del eje gu3a y se predetermina una fuerza ( $F_{max}$ ) ante la que el manipulador debe ceder de forma flexible y/o una l3nea de acci3n ( $s + \lambda k$ ) a lo largo de la cual debe desviarse el manipulador de modo flexible, particularmente en el espacio de trabajo; y opcionalmente se conmuta entre una regulaci3n flexible y una regulaci3n r3gida (S40); donde la l3nea de acci3n puede ser una consecuencia de las posiciones y orientaciones del TCP, una recta, una curva, una superficie, una hipersuperficie o un hiperespacio.
- 15 2. Procedimiento seg3n la reivindicaci3n 1, caracterizado porque se determinan varias l3neas de acci3n posibles, en particular en base a una posibilidad de control a lo largo de la l3nea de acci3n y/o en base a una posibilidad de observaci3n de la fuerza, se selecciona una de ellas y se predetermina como l3nea de acci3n ( $s + \lambda k$ ) a lo largo de la cual debe desviarse flexiblemente el manipulador.
- 20 3. Procedimiento seg3n cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque al menos se determina como eje gu3a un eje de movimiento del manipulador en base a su controlabilidad a lo largo de la l3nea de acci3n predeterminada y/o en base a la posibilidad de observaci3n de la fuerza.
4. Procedimiento seg3n cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1 a 3, caracterizado porque la fuerza y/o la l3nea de acci3n se transforma en el espacio articulado (S20).
5. Procedimiento seg3n la reivindicaci3n 4, caracterizado porque la transformaci3n se linealiza y/o adapta localmente.
- 25 6. Procedimiento seg3n cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado porque se configura una regulaci3n flexible como regulaci3n de fuerza y/o porque se configura una regulaci3n r3gida como regulaci3n posicional.
7. Procedimiento seg3n la reivindicaci3n 6, caracterizado porque se configura la regulaci3n flexible como regulaci3n indirecta de fuerza, en particular como regulaci3n de impedancia, o como regulaci3n directa de fuerza, en particular como regulaci3n paralela de fuerza y posici3n.
- 30 8. Procedimiento seg3n una de las reivindicaciones anteriores 6 a 7, caracterizado porque para la regulaci3n de la fuerza se averigua la fuerza que act3a sobre el manipulador en base a una fuerza de reacci3n en un accionamiento de al menos un eje gu3a, en particular en base a un valor de la corriente de un motor el3ctrico de accionamiento.
- 35 9. Procedimiento seg3n cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque un valor te3rico de otro eje depende de lineal o no linealmente de un valor real de al menos un eje gu3a ( $(q_{2s} = 0 \cdot q_{3mess}$ ,  $q_{5s} = -q_{3mess}$ ); ( $q_{3s} = q_{2mess}$ ;  $q_{5s} = (y_2/y_6)q_{2mess}$ )).
10. Procedimiento seg3n cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se eligen diferentes ejes gu3a en funci3n de una postura del manipulador.
- 40 11. Dispositivo de control (4) para un manipulador, particularmente un robot (1), comprendiendo:
  - un regulador flexible para al menos un eje gu3a; y
  - un regulador r3gido para al menos otro eje
  - caracterizado porque los reguladores est3n dise3ados para llevar a cabo un procedimiento seg3n cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
- 45 12. Programa de computador que realiza un procedimiento seg3n cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 cuando se desarrolla en un dispositivo de control seg3n la reivindicaci3n 11.
13. Producto de programa de computador con c3digo de programa que est3 almacenado en un soporte legible por la m3quina y comprende un programa de computador seg3n la reivindicaci3n 12.



Fig. 2

