

ACOPLAMIENTO DE PRIMITIVAS DE MOVIMIENTOS DINÁMICOS

Pablo J. Alhama, Fares J. Abu-Dakka, Juan A. Escalera y Mohamed Abderrahim
Robotics Lab., Universidad Carlos III de Madrid, Leganés (Madrid) España.
palhama@pa.uc3m.es, {[fabudakk](mailto:fabudakk@ing.uc3m.es), [jescalera](mailto:jescalera@ing.uc3m.es), [mohamed](mailto:mohamed@ing.uc3m.es)}@ing.uc3m.es

Resumen

La generación de trayectorias complejas o la reproducción de trayectorias aprendidas de movimientos naturales o demostraciones humanas, aplicadas a robots con elevados grados de libertad, se caracterizan por un alto grado de destreza. Por ello se requiere una descomposición en primitivas o secuencias simples que faciliten la configuración motora. En otras ocasiones es necesario construir las trayectorias complejas mediante la unión de trayectorias primitivas o simples. En ambos supuestos es necesario garantizar unas condiciones de continuidad en posición, y además, condiciones de suavidad en velocidad y aceleración. En este artículo se investiga el problema del acoplamiento de trayectorias primitivas de manera dinámica. Para resolverlo se propone un algoritmo adaptativo basado en un sistema dinámico no lineal empleando Primitivas de Movimientos Dinámicos (DMPs).

Palabras Clave: Generación de trayectorias, Primitivas de Movimientos Dinámicos, Destreza, Acoplamiento de movimientos.

1 INTRODUCCIÓN

En un contexto en el que intervienen manipuladores robóticos realizando movimientos complejos en entornos dinámicos, con altos requerimientos de destreza [2] y a semejanza de las trayectorias naturales realizadas por personas o animales, surge la idea de encontrar una manera de simplificar estos movimientos. Una forma sencilla y a priori resolutive es la descomposición de éstos movimientos complejos en movimientos primitivos [1]. Entendiéndose por primitivo como aquello que es primero en su línea, como elemento discreto o que no tiene ni toma origen de otra cosa [3].

Una vez que los movimientos complejos se han dividido y simplificado en primitivas es posible su almacenamiento en colecciones de datos, como puede ser para un robot bípedo [4]. Esta colección va a permitir, en función de los criterios establecidos de

división y almacenamiento, disponer de una variedad de movimientos primitivos suficientemente amplia para reproducir nuevas trayectorias. Las nuevas trayectorias pueden incluso ser fruto del aprendizaje de los movimientos primitivos almacenados en la base de datos [14].

Una vez definidas las esencias del método, tan solo resta materializar estos conceptos mediante algoritmos y sistemas que los validen. Para facilitar la comprensión, el método se puede subdividir, primeramente en la obtención de las trayectorias complejas, ya sea por imitación [15] o por observación [13] y [14], el fraccionamiento en movimientos primitivos [1], el almacenamiento en colecciones de datos [10], y por último el aprendizaje [9], o acoplamiento de primitivas [11], [12].

Establecido el DMP como un algoritmo basado en un sistema dinámico no lineal, una de las propiedades más importante de las DMPs, es la gran capacidad de modular en tiempo real la trayectoria generada por causa de perturbaciones inesperadas. El ingenio de la detención de fase [12] se puede utilizar para reducir la velocidad de la ejecución del robot. Otra propiedad importante es la posibilidad de tener en cuenta las perturbaciones externas e incluir información de realimentación obtenida mediante sensores. Al añadir esta información se puede ajustar el tiempo de ejecución [16] y/o evitar ciertas áreas o zonas del espacio del trabajo.

Este artículo se centra en el acoplamiento de movimientos primitivos y se va a estructurar en diferentes apartados. El siguiente apartado está dedicado al fundamento matemático. El tercer apartado se centra en el algoritmo de detección de fase. El cuarto está enfocado en el correcto acoplamiento de trayectorias con base en trayectorias primitivas, y como se han establecido los parámetros de ajuste con una muestra sencilla de trayectorias rectilíneas con pendiente. Un penúltimo apartado en el que se experimenta con el acoplamiento de caracteres individuales manuscritos del alfabeto romano obtenidos mediante demostración humana, y por último, terminando con las conclusiones.

2 FUNDAMENTO MATEMÁTICO Y FORMULACIONES

Este trabajo se fundamenta en las Primitivas de Movimientos Dinámicos como sistema de codificación de las trayectorias. Se han elegido las DMPs por su capacidad de operar con la totalidad de los parámetros de control del robot. Están basadas en ecuaciones diferenciales no lineales y se ha partido del contenido expuesto en [6]. Además proporcionan unos parámetros de control cinemático suaves. Ésto es esencial para realizar todos los movimientos requeridos por las tareas industriales de forma robusta y autónoma [12]. Las DMPs son muy apropiadas para gestionar incertidumbres, situaciones no conocidas con certeza, imprevistos, sucesos no esperados, etc., [12]. Ésto sucede por varios motivos, primeramente garantizan una transición suave de cualquier cambio imprevisto en el objetivo de la trayectoria debido a una realimentación sensorial [18]; en segundo lugar, porque proporcionan el marco adecuado para el aprendizaje y la adaptación de trayectorias utilizando algoritmos de aprendizaje y de refuerzo; en tercer lugar, por permitir el aprendizaje de todo tipo de trayectorias tomando como base una o más de una trayectoria dada [7]; y en cuarto lugar porque no dependen explícitamente del tiempo.

2.2 PARÁMETROS DE CONTROL COMO SISTEMAS DINÁMICOS

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos de la representación motora desarrollado según [8] y [17]. En este documento se tratan las DMPs discretas que codifican los parámetros de control de movimientos discretos punto a punto. Para las DMPs rítmicas se puede consultar [8] y [5]. Una DMP para una trayectoria y de solo un grado de libertad se define según [7], como el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales (1), (2) y (3).

$$\tau \dot{z} = \alpha_z (\beta_z (g - y) - z) + f(x) \quad (1)$$

$$\tau \dot{y} = z \quad (2)$$

$$\tau \dot{x} = -\alpha_x x \quad (3)$$

con un valor inicial $x(0)=1$. La solución de (3) viene dada por (4):

$$x(t) = e^{-\alpha_x t / \tau} \quad (4)$$

Donde x es la variable de fase y z es una variable auxiliar. β_z se selecciona apropiadamente junto a α_z según $\alpha_z = 4 \cdot \beta_z$ y $\alpha_x > 0$, como constantes de amortiguamiento, y $\tau > 0$ constante, como factor de escalado temporal. Sus valores son determinados de forma que se asegure la convergencia de la dinámica

del sistema. Este sistema de ecuaciones diferenciales tiene una única solución o punto de atracción $y=g, z=0$. $f(x)$ se define como una combinación lineal de N funciones no lineales de base radial, las cuales permiten al robot seguir una trayectoria suave desde la posición inicial y_0 , hasta la configuración final g .

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x)} x (g - y_0) \quad (5)$$

$$\Psi_i(x) = \exp\left(-h_i (x - c_i)^2\right) \quad (6)$$

Donde c_i es el centro de la distribución Gaussiana a lo largo de la fase de la trayectoria y h_i es su ancho.

Para una determinada N y considerando la constante del tiempo $\tau = t_T$ se puede definir

$$c_i = \exp\left(-\alpha_x \frac{i-1}{N-1}\right), \quad h_i = \frac{1}{(c_{i+1} - c_i)^2}, \quad h_N = h_{N-1},$$

$i = 0, \dots, N$. Para cada grado de libertad cartesiana, el peso w_i se estima mediante los datos medidos y utilizando una regresión según [11], siendo g la última configuración guardada durante la trayectoria. De esta forma se obtiene la trayectoria deseada, como se muestra en la parte experimental de concatenación de caracteres manuscritos.

Dado que las DMPs discretas han sido diseñadas para representar movimientos discretos punto a punto, el movimiento de acoplamiento debe transcurrir de forma totalmente suave y continua al final de la trayectoria, es decir, en el tiempo t_T .

3 DETECCIÓN DE FASE Y ACOPLAMIENTO DE PRIMITIVAS

Normalmente, la Ecuación (3) no está analíticamente integrada en (4). En su lugar, a la hora de ejecución (3) y (2) se modifican de la siguiente forma:

$$\tau \dot{x} = -\frac{\alpha_x x}{1 + \alpha_{px} \|y_{deseada} - y_{actual}\|} \quad (7)$$

$$\tau \dot{y} = 1 + \alpha_{py} (y_{deseada} - y_{actual}) \quad (8)$$

donde $y_{deseada}$ e y_{actual} respectivamente representan la posición deseada y la posición actual del robot. Nótese que si el robot no es capaz de seguir la trayectoria deseada, $\alpha_{px} (y_{deseada} - y_{actual})$ aumenta, lo que provoca pequeños cambios en la fase x . Así pues, la evolución de la fase se detiene hasta que el robot recupera la configuración deseada y ,

como se puede ver en la Figura 1. Por otro lado, si el robot sigue el movimiento deseado de forma precisa, la ecuación (7) funciona de la misma forma que la (3).

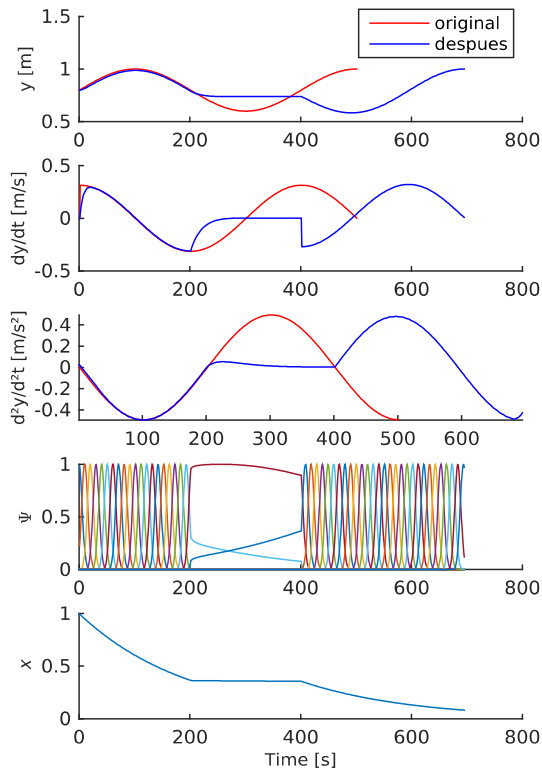


Figura 1: Generador de patrones discretos con reacción ante perturbaciones empleando frenado de realimentación “slow down feedback” La posición deseada $y_{deseada}$, y la actual y_{actual} se suponen idénticas excepto durante un corto periodo de tiempo en el cual la posición y es fijada a un valor entre $t=2$ s y $t=4$ s

4 ACOPLAMIENTO DE PRIMITIVAS DE MOVIMIENTOS DINÁMICOS

Por aplicación de la formulación original cada primitiva parte de un estado inicial para llegar a un estado final de tal forma que en ambos estados la velocidad sea nula, lo cual tiene correspondencia directa con cualquier movimiento que parte de una condición estacionaria de reposo para alcanzar otra también de reposo. Por lo tanto, de una simple unión de primitivas no se va a obtener una trayectoria uniforme y suave, si no, todo lo contrario, la trayectoria va a ser de tipo arranca para, como se puede ver en la Figura 2 y la Figura 3. Estas condiciones requieren la adaptación de las primitivas de tal manera que sus condiciones iniciales y finales, o condiciones de unión estén correctamente definidas.

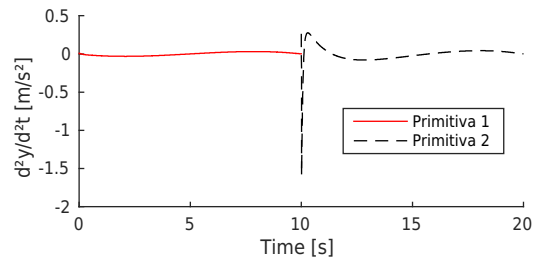


Figura 2: Discontinuidad en aceleración

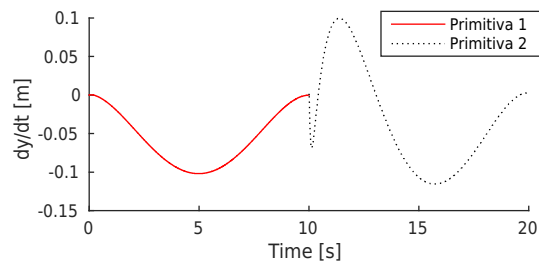


Figura 3: Discontinuidad en velocidad

Las condiciones que garantizan una continuidad en relación con la posición y la velocidad se indican en (9), donde “previa” hace referencia a la primitiva anterior y “siguiente” a la primitiva posterior. Por otro lado la continuidad de la aceleración se garantiza con un filtro de primer orden para el estado del objetivo [8]. En concreto, el sistema canónico de tercer orden se define mediante (10).

$$y_{siguiente}(1) = y_{previa}(x_e) \quad (9)$$

$$v_{siguiente}(1) = \dot{y}_{previa}(x_e)$$

$$\dot{g} \cdot \tau = \alpha_g \cdot (G - g) \quad (10)$$

$$\text{donde: } \alpha_g = \sqrt{(\alpha_z \cdot \beta_z)}$$

Por otro lado es necesario establecer una correcta parametrización de las constantes de amortiguamiento definidas con anterioridad.

La correcta parametrización de estas constantes se obtiene de la resolución del sistema de ecuaciones (9) y (11) con la condición $f=0$. Se puede ver más detalladamente en [11].

Además se introduce una tercera condición de unión vinculada con el objetivo parcial g según la ecuación (11).

$$g = \frac{A + B - f(1)}{\alpha_z \cdot \beta_z} + C \quad (11)$$

$$A = \tau_{siguiente}^2 \cdot \ddot{y}_{previa}(x_e)$$

$$\text{donde: } B = 2 \cdot \alpha_g \cdot \tau \cdot \dot{y}_{previa}(x_e) - f(1)$$

$$C = y_{previa}(x_e)$$

Estas condiciones van a adaptar la trayectoria de manera satisfactoria hasta la derivada de segundo orden.

Con el objeto de verificar las condiciones de continuidad se ha probado la unión de dos trayectorias simples definidas por dos rectas. La primera de pendiente positiva y la segunda de pendiente negativa. Como resultado, en la Figura 4 se pueden observar los resultados de continuidad y suavidad obtenidos en relación con la posición, velocidad y aceleración. Si bien la aceleración puede parecer que cambia bruscamente, si se observa con detalle, el cambio se realiza de manera suave y suficientemente atenuada como para ser tolerable por los motores, siendo el resultado de total continuidad. Tras una fase experimental previa con manipuladores robóticos, se podrá determinar su grado de acercamiento a la destreza humana.

Otro parámetro que se puede observar en la Figura 4, es la evolución de la fase en el tiempo para cada una de las primitivas. Comenzando en 1 y terminando próximo al valor nulo.

Los resultados obtenidos se han mejorado ligeramente con respecto a [12] ya que mejora la suavidad de la velocidad y la aceleración obtenida en el punto de unión.

5 EXPERIMENTACIÓN MEDIANTE UNIÓN DE PRIMITIVAS DE CARACTERES MANUSCRITOS

El objetivo de experimentar con la concatenación de caracteres es mostrar de una manera práctica como se pueden formar palabras, frases, párrafos o incluso dibujos artísticos con origen en una colección de datos de primitivas. En la aplicación concreta, la base de datos es el alfabeto romano, empleado de manera extendida en un gran número de idiomas. Las primitivas se han guardado mediante demostración humana carácter a carácter.

5.1 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN LA SIMULACIÓN

Tal y como se vio en el apartado 2, es necesario determinar los valores de las constante de amortiguamiento, el número de funciones y sus anchos, así como el diferencial de tiempo de integración. Estos valores no se pueden parametrizar de manera general, ya que para cada aplicación de DMPs se puede concretar obteniendo unos resultados mejores.

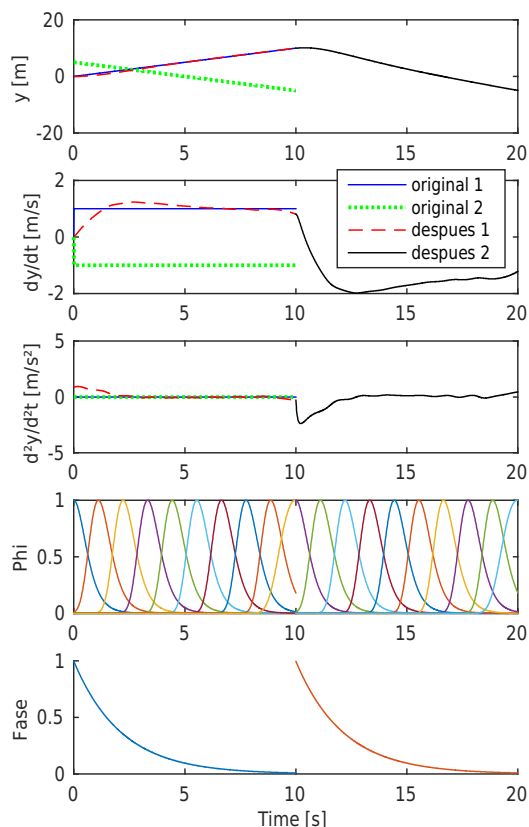


Figura 4: Unión de dos primitivas, la primera primitiva es una línea recta de pendiente positiva y la segunda es una recta igualmente, pero de pendiente negativa

Partiendo de unos valores de referencia propuestos en [12], se han ido analizando y ajustando para que el resultado pueda ser óptimo y se consigan unas condiciones de suavidad comparables con la propia destreza humana. Aspecto que se ha de comprobar experimentalmente mediante la implementación en manipuladores robóticos. Los valores usados se pueden ver en la tabla 1

Tabla 1: Parámetros y constantes

Nombre	Valor
α_z	28
α_x	9,3
N	30
dt	0,01

5.2 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO

En este experimento se establecen unas condiciones de contorno cerradas, se dispone de una colección de datos de primitivas, una formulación matemática exacta y un método de captura de caracteres mediante teclado para determinar la palabra que se desea caligrafiar.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Se desea caligrafiar mediante un efector terminal de un brazo robótico una palabra definida y elegida mediante un periférico cualquiera. En este caso concreto se emplea un teclado de tipografía romana para definir la palabra a caligrafiar, y que es introducida manualmente. La palabra se analiza identificando cuales son los caracteres de que dispone. A continuación, identificados los caracteres, se obtienen de la colección de datos las trayectorias guardadas. Las trayectorias han sido guardadas mediante demostración humana a través de un dispositivo de captura gráfica. Una vez que se han identificado los caracteres se generan las DMPs aplicando el algoritmo matemático con la configuración de parámetros de la Tabla 1. Los parámetros se han definido de manera experimental buscando una aplicación óptima en acoplamiento de caligrafía humana. Como resultado se obtiene la palabra completa de la trayectoria generada mediante la unión de las primitivas. Una muestra del resultado se puede ver en la Figura 5., donde se puede además apreciar la destreza de la caligrafía humana original en color azul para la primera letra original, y en color rojo para el primer carácter con la destreza reproducida después de aplicar el algoritmo. Los puntos de unión entre caracteres aparecen recuadrados para resaltar la continuidad en la transición de un carácter al siguiente una vez que se ha hecho el acoplamiento.

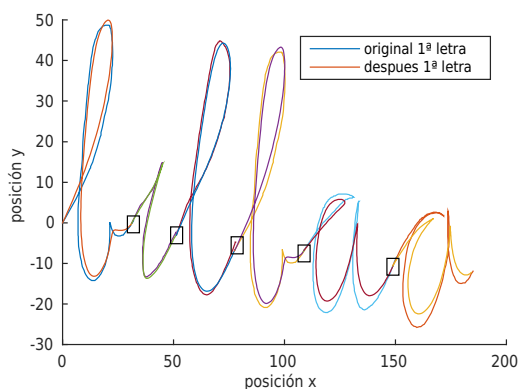


Figura 5: Trayectoria caligráfica obtenida de la unión de primitivas

En la Figura 6 se puede ver una secuencia de experimentos realizados para las palabras, jornadas, comité, automática y robótica. Es fácilmente visible la suavidad de las trayectorias y como la continuidad entre letras impide identificar el punto de unión de los caracteres.

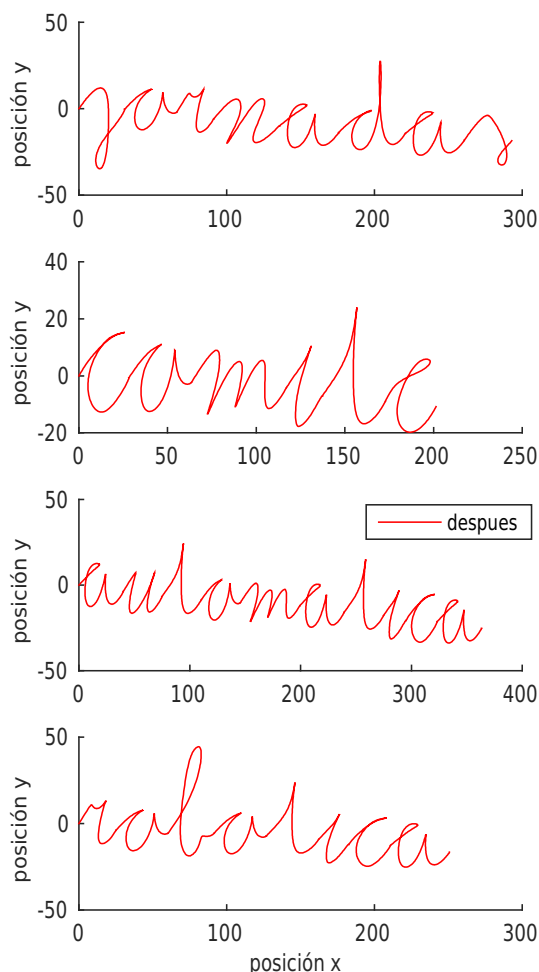


Figura 6: Experimentos variados

6 CONCLUSIÓN

Dentro del extenso campo de aplicación de que disponen las DMPs se muestra la buena gestión en cuanto a suavidad y destreza en la unión de primitivas. Esta muestra es extensible a cualquier tipo de trayectoria compleja en un entorno dinámico. Obviamente el entorno industrial cooperativo, dinámico y multirobot es uno de los principales campos de aplicación en los que profundizar. Por otro lado el experimento se puede completar o extender a trabajos artísticos o de personalización que permitan desarrollar textos completos, lienzos, etc. De un análisis más profundo se puede comprobar como el disponer de una buena colección de datos habilita la construcción de trayectorias de cualquier índole y grado de complejidad. Si bien en este trabajo el aprendizaje es un aspecto secundario es importante destacar que el aprendizaje de trayectorias mediante el empleo de DMPs, es relevante por si mismo o incluso con la obtención de información basada en sensores. Éste Aspecto tiene paralelismo con el aprendizaje psicomotriz que realiza un niño desde edades tempranas y requiere que alcance la edad adulta. De tal manera que el aprendizaje con DMPs

no requiere alcanzar la edad adulta y se puede conseguir en unos tiempos casi inmediatos. Teniendo en cuenta todo lo que antecede impera una razonable idea de continuar investigando y desarrollando este algoritmo de modo que su adaptación esté totalmente integrado en un entorno dinámico industrial sin descartar otros entornos también dinámicos y colaborativos con el ser humano o de una manera general con la naturaleza.

Agradecimientos

El trabajo descrito en esta publicación ha sido financiado parcialmente por el MINISTERIO DE ECONOMIA Y COMPETITIVIDAD en el proyecto con referencia RTC-2014-3070-5. Además, el trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748) financiado por Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

- [1] Bizzi, E., Mussa-Ivaldi, F.A., Giszter, S., (1991), Computations underlying the execution of movement: A biological perspective, *Science*, 253(5017), pp. 287-291.
- [2] Brogårdh, T., (2007), Present and future robot control development - An industrial perspective, *Annual Reviews in Control*, 31(1), pp. 69-79.
- [3] d'Avella, A., Saltiel, P., Bizzi, E., (2003), Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior, *Nature neuroscience*, 6(3), pp. 300-308.
- [4] Denk, J., Schmidt, G., (2003), Synthesis of walking primitive databases for biped robots in 3D-environments, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 1, pp. 1343-1349.
- [5] Gams, A., Ijspeert, A. J., Schaal, S., Lenarčič, J., (2009), On-line learning and modulation of periodic movements with nonlinear dynamical systems, *Autonomous robots*, 27(1), pp. 3-23.
- [6] Ijspeert A, Nakanishi J, Schaal S., (2003), *Dynamic Movement Primitives*, Recuperado en febrero de 2015, de <http://www-clmc.usc.edu/Resources>.
- [7] Ijspeert, A. J., Nakanishi, J., Hoffmann, H., Pastor, P., Schaal, S., (2013), Dynamical movement primitives: learning attractor models for motor behaviors, *Neural computation*, 5(2), pp. 328-373.
- [8] Ijspeert, A. J., Nakanishi, J., Schaal, S., (2003), Learning attractor landscapes for learning motor primitives, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 15, pp. 1547-1554.
- [9] Ijspeert, A. J., Nakanishi, J., Schaal, S., (2002), Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 2, pp. 1398-1403.
- [10] Lim, B., Ra, S., Park, F. C., (2005), Movement primitives, principal component analysis, and the efficient generation of natural motions, *International Conference on In Robotics and Automation*, Barcelona, España, pp. 4630-4635.
- [11] Nemec, B., Tamošiūnaitė, M., Wörgötter, F., Ude, A., (2009), Task adaptation through exploration and action sequencing, *9th International Conference on Humanoids Robots*, Paris, France, pp. 610-616.
- [12] Nemec, B., Ude, A., (2012), Action sequencing using dynamic movement primitives, *Robotica*, 30(05), pp. 837-846.
- [13] Pastor, P., Hoffmann, H., & Schaal, S., (2008), Movement generation by learning from demonstration and generalizing to new targets, In *Fourth International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, 1, pp. 1-2.
- [14] Pastor, P., Hoffmann, H., Asfour, T., Schaal, S., (2009), Learning and generalization of motor skills by learning from demonstration, *International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan, pp. 763-768.
- [15] Schaal, S., Ijspeert, A., & Billard, A., (2003), Computational approaches to motor learning by imitation, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1431), pp. 537-547..
- [16] Schaal, S., Mohajerian, P., Ijspeert, A., (2007), Dynamics systems vs. optimal control - a unifying view, *Progress in brain research*, 165, pp. 425-445.
- [17] Schaal, S., Peters, J., Nakanishi, J., Ijspeert, A., (2005), Learning movement primitives, En *Robotics Research: The Eleventh International Symposium*, Dario, P., Chatila, R., editores, Springer Berlin Heidelberg, pp. 561-572.
- [18] Schaal, S., Vijayakumar, S., Ijspeert, A. J., & Nakanishi, J., (2001), Real-time statistical learning for robotics and human augmentation, *International Symposium of Robotics Research*, Lorne, Victoria, Australia, pp. 117-124.