

# Planificación de movimientos para conjuntos mano-brazo con numerosos grados de libertad

Raúl Suárez y Jan Rosell

**Abstract**—Con el objetivo de avanzar hacia la emulación de las capacidades y destreza de la mano humana se están desarrollando manos robóticas con prestaciones muy superiores a las tradicionales pinzas usadas en la robótica industrial. El uso de estas manos robóticas conlleva asociados nuevos retos, y entre ellos está el de la planificación eficiente de sus movimientos, ya que aunque algunos métodos de planificación tradicionales podrían ser válidos, su aplicación práctica es limitada debido sobre todo al elevado número de grados de libertad que tiene un sistema robótico que incluya una mano antropomorfa montada sobre un brazo manipulador. Este artículo presenta un enfoque que permite soluciones suficientemente eficientes para ser utilizadas en la práctica. El enfoque propuesto está basado en la reducción de la dimensión del espacio de búsqueda y en la utilización de técnicas de muestreo para generar movimientos del conjunto mano-brazo en entornos con obstáculos que pueden imponer fuertes restricciones en la búsqueda de movimientos sin colisión, como sucede normalmente cuando la mano se acerca a un objeto para su sujeción y manipulación. Los desarrollos teóricos han sido implementados tanto en simulación como en un sistema físico real, por lo que se incluyen resultados experimentales reales.

## I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de robótica ya se han desarrollado robots humanoides capaces de caminar y robots móviles capaces de autolocalizarse y buscar de forma autónoma caminos hacia su objetivo, pero a pesar de ello la interacción física con el entorno sigue estando (aun en los casos mencionados) limitada a acciones muy básicas que con frecuencia se realizan mediante herramientas específicas poco versátiles, lo que limita notablemente su campo de aplicación.

De cara a solventar este problema se están construyendo elementos prensores de alta versatilidad, especialmente manos mecánicas antropomorfas que intentan alcanzar la altísima destreza y versatilidad de la mano humana. Estos dispositivos tienen normalmente un número de grados de libertad (GDL) que va de 12 (4 dedos con 3 GDL independientes cada uno) a 25 (5 dedos con 4 GDL independientes cada uno más uno en la palma de la mano) [1]. Algunos ejemplos de manos antropomorfas con 4 dedos son las manos Utah/MIT [2], DIST [3], LMS [4]; DLR [5] y MA-I [6], y con 5 dedos las manos Belgrade/USC [7], Anthrobot-2 [8], NTU [9], ROBONAUT [10], Gifu [11], Shadow [12] y Bolonia 3 [13]. Dos buenas revisiones de los

principales aspectos de las manos robóticas se encuentran en [14], [15].

Sin embargo, aun contando con estos dispositivos, debido a su elevado número de grados de libertad, a la complejidad de la cinemática y dinámica del conjunto mano-objeto, y a la complejidad del tratamiento de la información sensorial, la determinación de forma autónoma de los movimientos adecuados para llegar a un objeto y realizar su prensión sigue siendo un problema cuya dificultad puede limitar sustancialmente la utilidad del dispositivo prensor. Este problema se puede formular como un problema clásico de planificación de movimientos, pero con un espacio de búsqueda de elevada dimensión que limita su eficiencia. Por lo tanto, son necesarios nuevos enfoques que permitan encontrar soluciones de forma más eficiente y que sean de utilidad en la práctica.

Este artículo presenta dos técnicas dedicadas a este fin, buscando no sólo eficiencia sino también que las soluciones encontradas, libres de colisiones, usen posturas de la mano equivalentes a las que usaría un humano.

## II. FORMALIZACIÓN DEL PROBLEMA Y SOLUCIÓN PROPUESTA

Sea  $\mathcal{C} = \mathcal{C}^h \times \mathcal{C}^a$  el espacio de configuraciones del sistema mano-brazo, donde  $\mathcal{C}^h$  y  $\mathcal{C}^a$  son los espacios de configuraciones de la mano y del brazo respectivamente. La dimensión de  $\mathcal{C}$  es igual al número de GDL de la mano más el del brazo.

El problema a resolver es el siguiente: dada una configuración inicial mano-brazo  $c_{ini} \in \mathcal{C}$  y una final deseada  $c_{goal} \in \mathcal{C}$  (que puede ser de prensión o de pre-prensión), se debe encontrar un camino libre de colisiones en  $\mathcal{C}$  desde  $c_{ini}$  a  $c_{goal}$ , es decir, un camino libre de colisiones para el sistema mano-brazo.

El enfoque propuesto para resolver el problema tiene como principales características:

- El uso de métodos basados en muestreo.
- Una reducción de la dimensión del espacio de búsqueda, buscando un subespacio  $\mathcal{SC}^h$  del espacio de configuraciones de la mano  $\mathcal{C}^h$  y caminos continuos sin colisiones en el espacio  $\mathcal{SC} = \mathcal{SC}^h \times \mathcal{C}^a$ . Es evidente que puede haber soluciones en  $\mathcal{C}$  no incluidas en  $\mathcal{SC}$ , lo que pone de manifiesto la importancia de elegir adecuadamente  $\mathcal{SC}$  e implícitamente  $\mathcal{SC}^h$  (esta elección es una de las contribuciones originales del enfoque), pero si se encuentra una solución en  $\mathcal{SC}$  entonces seguro que es válida en  $\mathcal{C}$ .

Los autores son miembros del Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, raul.suarez@upc.edu.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno Español mediante los proyectos PI09/90088, DPI2010-15446 y DPI2008-02448.

- Además de reducir la dimensión del espacio de búsqueda, también se lleva a cabo una reducción de la zona del subespacio donde se realiza el muestreo, lo que incrementa la eficiencia global. La forma de llevar a cabo esta reducción es otra de las contribuciones originales del enfoque.

### III. CONCEPTOS BÁSICOS Y ELEMENTOS UTILIZADOS

#### A. Métodos basados en muestreo para la planificación de caminos

La búsqueda de caminos libres de colisiones para mover un robot de una configuración inicial a una final puede hacerse de muchas maneras [16], aunque los métodos basados en muestreo son la mejor alternativa para problemas con muchos GDL. Estos métodos se basan en la generación de muestras libres de colisiones del espacio de configuraciones  $\mathcal{C}$ , y en su interconexión mediante caminos libres de colisiones, para capturar la conectividad del espacio libre de  $\mathcal{C}$  formando mapas de carreteras (PRMs, del inglés *Probabilistic Road Maps* [17]) o árboles (RRTs, del inglés *Rapidly-exploring Random Trees* [18]). Se ha demostrado que éstos métodos son completos a nivel probabilístico, y que un punto clave de su desempeño es la generación de muestras de configuraciones en áreas de  $\mathcal{C}$  relevantes para el problema, lo que puede realizarse mediante técnicas de sesgado del muestreo o mediante técnicas de reducción de la dimensión [19].

Algunas de las estrategias para sesgar el muestreo y aumentar la densidad de muestras en áreas críticas usan información del espacio de trabajo (e.g. [20], [21]) o información capturada durante la construcción del mapa o árbol (e.g. [22], [23]). Otras sobremuestran  $\mathcal{C}$  y eliminan las configuraciones no prometedoras (e.g. [24], [25]), o deforman (dilatan) las regiones libres de  $\mathcal{C}$  para hacerlo más expansivo y capturar su conectividad con mayor facilidad.

Las técnicas de reducción de la dimensión, por otra parte, se focalizan en definir las subvariedades de  $\mathcal{C}$  donde se hallan las soluciones (o donde es más fácil encontrar soluciones), y en obtener muestras de ellas. Este es el caso, por ejemplo, de las subvariedades definidas por las configuraciones que satisfacen restricciones de cadenas cinemáticas cerradas [26], restricciones dinámicas [27], o restricciones dependientes de la tarea [28], [29], [30], [31].

#### B. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principal (PCA, del inglés *Principal Component Analysis*) es una técnica estadística usada para procesar un conjunto de muestras vectoriales buscando una nueva base del espacio de muestras tal que sus ejes indiquen, de forma decreciente, las direcciones del espacio con mayor información para discriminar las muestras. Esto significa que la dispersión de las muestras es máxima según la primera dirección de la nueva base y va decreciendo en las siguientes.

Esta técnica se usa frecuentemente para reducir la dimensión  $n$  del espacio de trabajo inicial, usando en

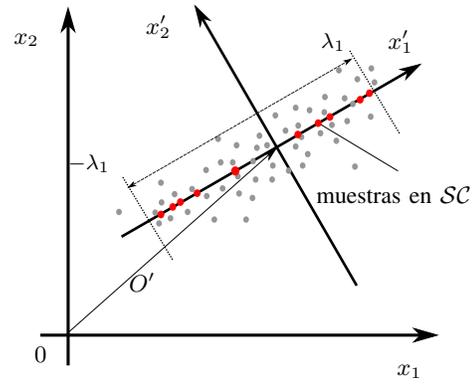


Fig. 1. Ilustración del uso de PCA para reducir el espacio de trabajo. El espacio original bidimensional  $\mathcal{C}$  está definido por  $x_1$  y  $x_2$ , la media del conjunto de muestras inicial es  $O'$ , la dirección con mayor dispersión de muestras es  $x'_1$ , y la nueva base está definida por  $x'_1$  y  $x'_2$ . Así, el nuevo espacio de trabajo está definido por  $x'_1$ , y la porción válida se restringe al rango  $[-\lambda_1, \lambda_1]$ .

su lugar un subespacio de dimensión  $m < n$  definido por las primeras  $m$  direcciones según la nueva base y descartando las restantes. Es normal encontrar PCA para simplificar el problema de reconocimiento de formas y en aplicaciones de clasificación; en el campo de planificación de caminos es de uso frecuente para reducir la dimensión del espacio de búsqueda y por lo tanto reducir el tiempo de planificación. Hay diferentes maneras de realizar un PCA [32], se puede hacer calculando los valores propios de la matriz de covarianza del conjunto de datos o calculando los valores singulares de la matriz de datos (siempre después de centrar los datos en su media); cuanto mayores sean los valores propios o los valores singulares, mayor será la dispersión de las muestras en la dirección de los vectores propios correspondientes, que se usan directamente para definir la nueva base.

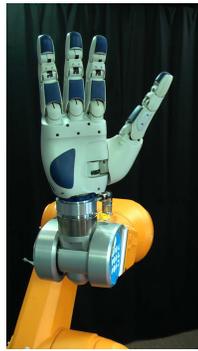
La Figura 1 muestra un ejemplo sencillo de uso de PCA para reducir la dimensión del espacio de trabajo  $\mathcal{C}$ . Los puntos grises representan muestras  $\vec{x}$  en un espacio bidimensional definido por las variables originales  $x_1$  y  $x_2$ .  $O'$  representa la media del conjunto de muestras, por lo que las muestras se corrigen como  $\vec{x}' = \vec{x} - O'$ . Luego, usando PCA se obtiene una nueva base  $x'_1$  y  $x'_2$  (que equivalen a dos variables virtuales del problema) que determinan el nuevo sistema de referencia con el origen en  $O'$ . Dado que la dispersión de las muestras es mayor según  $x'_1$ , la componente  $x'_2$  se descarta, lo que equivale a considerar un subespacio  $\mathcal{SC} \subset \mathcal{C}$  definido sólo por  $x'_1$ , es decir, la dimensión del espacio de trabajo se redujo de 2 a 1. Finalmente, la zona de este subespacio donde se tomarán nuevas muestras se reduce a una porción de  $\mathcal{SC}$  definida por el intervalo  $[-\lambda_1, \lambda_1]$ , tal que incluya un determinado porcentaje de muestras del conjunto de muestras inicial.

#### C. Hardware utilizado

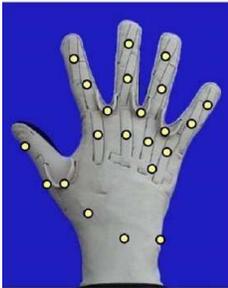
En este trabajo se ha utilizado el siguiente hardware: a) una mano robótica antropomorfa, b) un robot industrial, c) un



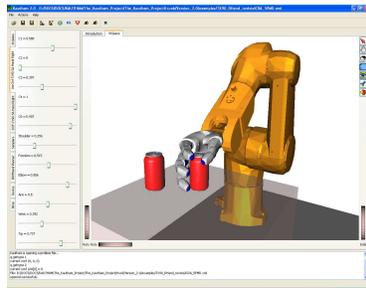
(a) Mano mecánica antropomorfa SAH.



(b) Robot industrial Stäubli TX 90 con la mano mecánica SAH.



(c) Guante sensorizado usado para capturar información del espacio de trabajo de la mano del operador.



(d) Simulador de la mano y robot en el entorno de programación.

Fig. 2. Hardware y software utilizado.

guante sensorizado. A continuación se describe brevemente cada elemento.

a) *Mano robótica antropomorfa*. Se ha usado la mano Schunk Anthropomorphic Hand (SAH) [33], mostrada en la Fig. 2a, basada en la mano DLR [5]. Tiene tres dedos con cuatro articulaciones cada uno y un pulgar con cinco articulaciones. En todos ellos la articulación distal está mecánicamente acoplada con la articulación media, y por lo tanto hay un total de 17 articulaciones con 13 GDL independientes.

b) *Robot Industrial*. La mano está montada en un robot industrial de uso general de 6 GDL Stäubli TX 90 (Fig. 2b) equipado con un controlador CS8.

c) *Guante sensorizado*. Se ha usado el guante sensorizado CyberGlove (Fig. 2c). Es un guante provisto de 22 sensores resistivos, incluye 3 sensores de flexión por dedo, cuatro de abducción entre los dedos, uno en la palma, y dos para medir la flexión y abducción de la muñeca.

#### D. Software utilizado

Se ha implementado una herramienta de simulación (Fig. 2d) para la evaluación de los planificadores desarrollados y para la interconexión con los dispositivos. Para el desarrollo se ha tenido en cuenta los siguientes requerimientos [34]: posibilidad de ejecutarse en diferentes plataformas, modularidad y uso de bibliotecas de software abierto. En este sentido, se ha usado Qt para la interfase

de usuario, Coin3D para la visualización 3D, PQP para la detección de colisiones, Boost Graph para la gestión de grafos, y ficheros XML para la entrada de datos. La herramienta permite trabajar con entornos con uno o varios robots formados por estructuras cinemáticas tipo árbol y cuya base puede ser móvil, y facilita la especificación de qué grados de libertad, o combinaciones lineales de los mismos, se actuarán. El módulo de planificación implementado está diseñado para facilitar el desarrollo de planificadores basados en muestreo, y para ello se provee de diferentes fuentes de muestreo y de una gestión eficiente de grafos. El módulo de comunicación con los dispositivos permite la conexión con el guante sensorizado Cyberglove, con el robot Stäubli TX90 y con la mano mecánica SAH [35].

#### IV. REDUCCIÓN DE LA DIMENSIÓN DEL ESPACIO DE BÚSQUDA

Para llevar a cabo la reducción del espacio de búsqueda se han tenido en cuenta las correlaciones entre los movimientos de las articulaciones de la mano humana, que implican una pérdida de grados de libertad. Como ejemplo más paradigmático se puede mencionar la correlación existente entre las dos últimas articulaciones de cada dedo, que generalmente en el espacio libre no pueden moverse de forma independiente. Estas y otra correlaciones se han extrapolado a la mano mecánica para limitar sus grado de libertad de una forma equivalente a como tiene esta limitación el ser humano.

Un primer trabajo relevante en esta línea [36] usa un conjunto de configuraciones de presión para determinar las correlaciones entre las articulaciones de la mano y fijar un espacio de presión bidimensional. Este subespacio bidimensional fue usado posteriormente para telemanipulación [37] y para la búsqueda de configuraciones de pre-prensión de la mano [38].

Una diferencia significativa entre estos trabajos y el que aquí se presenta es que en éste el conjunto de configuraciones de la mano usado para determinar las correlaciones entre articulaciones no está limitado a configuraciones de presión, sino que son configuraciones obtenidas a partir de movimientos de la mano sin restricciones tratando de cubrir todo su espacio de trabajo. Debido a esto, las direcciones escogidas para determinar el subespacio de búsqueda se han denominado Direcciones Principales de Movimiento, PMD (del inglés *Principal Motion Directions*).

El enfoque básico fue propuesto en [39] y consta de los siguientes pasos:

- 1) Usando el guante sensorizado se obtienen muestras del espacio de configuraciones de 22 GDL de la mano humana mediante la realización de movimientos libres.
- 2) Se fija una correspondencia entre los grados de libertad de la mano humana y los de la mano mecánica y se usa para proyectar las muestras anteriores al espacio de configuraciones de 13 GDL de la mano mecánica.
- 3) Usando Análisis de Componentes Principales (PCA) se busca un subespacio  $\mathcal{S}^h$  del espacio de configuraciones de la mano mecánica  $\mathcal{C}^h$ , usando los primeros

componentes. El primer PMD representa el 42.19% de la varianza total de las configuraciones muestreadas, los dos primeros PMDs representan el 77.12% y los tres primeros el 84.71%, con lo que el uso de tres PMDs se estima suficiente para definir el subespacio.

- 4) Se construye un mapa de carreteras (PRM):
  - Se generan muestras del subespacio del sistema mano-brazo  $\mathcal{SC} = \mathcal{SC}^h \times \mathcal{C}^a$  y se verifica que sean libres de colisiones.
  - Las configuraciones libres se conectan entre si (dentro de un radio de vecindad) siempre que exista entre ellas un camino rectilíneo en  $\mathcal{C}$  libre de colisiones.
- 5) Dadas las configuraciones inicial y final del sistema mano-brazo en  $\mathcal{C}$  (no necesariamente perteneciente a  $\mathcal{SC}$ ),  $c_{ini}$  y  $c_{goal}$ , se conectan al mapa y se usa el algoritmo  $A^*$  para buscar en éste un camino libre de colisiones entre ellas.

Los resultados obtenidos con este enfoque són: a) una reducción del tiempo de cálculo, básicamente debido a que mediante el uso de los PMDs el número de configuraciones de la mano en autocolisión se reduce considerablemente, y b) unos caminos solución que contienen posturas de la mano con apariencia humana.

Con la idea de mejorar el desempeño del planificador y de ahondar en la consecución de movimientos con apariencia humana, se han propuesto tres mejoras al enfoque básico:

- 1) A cada configuración del brazo se asocian varias configuraciones de la mano, permitiendo versatilidad y facilitando las conexiones entre muestras en zonas con poca holgura. Asimismo las configuraciones del brazo se obtienen muestreando en  $SE(3)$  alrededor de configuraciones que se encuentran en el camino entre la configuración de la muñeca inicial y la final (con un radio de muestreo creciente mientras no se encuentra solución), realizando luego la cinemática inversa [40]. Esto mejora la eficiencia al focalizar las configuraciones del brazo en la parte del espacio de trabajo relevante para la tarea.
- 2) Las muestras de la mano se obtienen usando un número creciente de PMDs, y el primer PMD que se considera no se obtiene del PCA sino que es la dirección de movimiento rectilíneo que debe realizarse para pasar de la configuración inicial de la mano a la configuración final [41]. Esta mejora hace más eficiente el enfoque permitiendo trabajar con el mínimo número de grados de libertad que requiera la tarea.
- 3) Las configuraciones del brazo también pueden obtenerse de un subespacio si se definen restricciones en su movimiento. Concretamente, si se fija la restricción de que la orientación de la muñeca sea tal que la palma de la mano apunte al objeto a asir, el número de grados de libertad baja de 6 a 4, y además los movimientos resultan más parecidos a los que realizaría un humano [42].

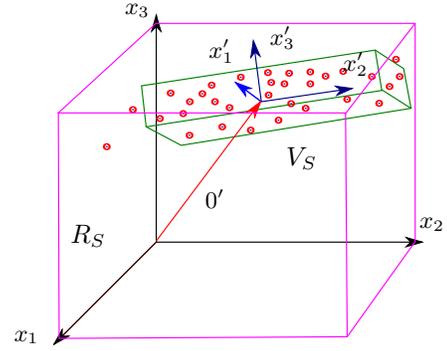


Fig. 3. Regiones  $R_S$  y  $V_S$  obtenidas usando PCA en un espacio de configuraciones  $\mathcal{C}$  de dimensión 3.

## V. REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE LA REGIÓN DE BÚSQUEDA

Como complemento a la reducción de la dimensión del espacio de búsqueda descrito en la sección anterior, se propone también el uso de PCA para reducir el tamaño de la región a explorar [43]. La idea básica se basa en los siguientes pasos:

- 1) Usar un análisis PCA para encontrar una nueva base del espacio de búsqueda usando configuraciones libres de colisión; el resultado es indicativo de la región donde con mayor probabilidad se pueden encontrar nuevas configuraciones libres de colisión (se considera la base completa generada con PCA, no hay reducción de dimensionalidad).
- 2) Realizar este análisis de forma periódica a medida que se van generando muestras libres de colisiones (cada un determinado número de muestras) de forma de ir adaptando la base que indica la región a muestrear.

Este procedimiento está concebido para actuar de forma local, es decir, se aplica a regiones de  $\mathcal{C}$  donde se sabe que está localizada el área de interés (e.g. donde hay un pasaje estrecho).

Considérense las dos regiones  $R_S$  y  $V_S$  siguientes (Fig. 3):

- $R_S$ : Región de  $\mathcal{C}$  donde se necesita un muestreo más intensivo (depende del problema a resolver).
- $V_S$ : Paralelepípedo orientado con los ejes que resultan de aplicar PCA a las muestras libres de colisión en  $R_S$ , y cuyos lados son proporcionales a las desviaciones encontradas en los mismos.

El procedimiento de optimización de la región de muestreo se va realizando de manera iterativa hasta que el planificador encuentra un camino solución:

- 1) Tomar  $k$  muestras de  $R_S$ .
- 2) Calcular  $V_S$ .
- 3) Seleccionar  $V_S$  o  $R_S$  con probabilidad  $\alpha$  y  $1 - \alpha$  respectivamente.
- 4) Tomar  $k$  muestras de la región seleccionada.
- 5) Recalcular  $V_S$ .
- 6) Añadir las muestras al planificador y salir si se encuentra camino solución.
- 7) Volver al punto 3

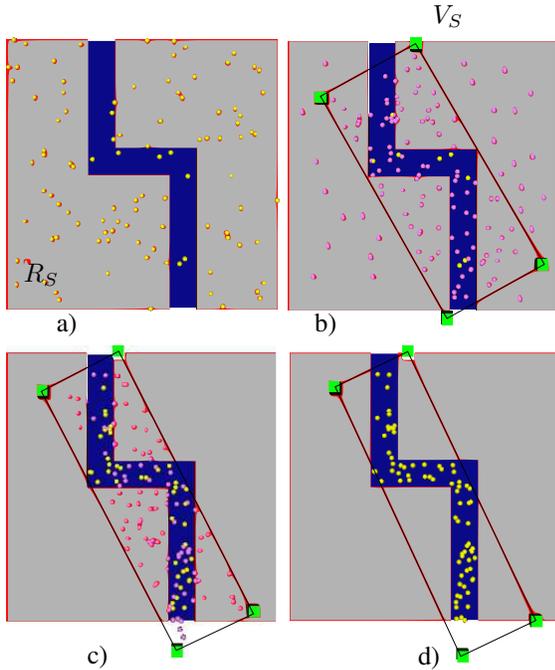


Fig. 4. Tomas parciales del muestreo de  $R_S$  y  $V_S$  con  $\alpha = 0,5$  y  $k = 80$ .

La alternancia en el muestreo de  $R_S$  y  $V_S$  es debida a que las muestras extraídas de  $R_S$  permiten una progresión en la evaluación de  $V_S$  que cada vez debe cubrir mejor la región de interés, mientras que el muestreo en  $V_S$  facilita la obtención de muestras válidas (libres de colisión). La Figura 4 ilustra esta alternancia.

Nótese que en este procedimiento hay dos parámetros que pueden ajustarse para optimizar el rendimiento. Por un lado, si  $k$  es grande entonces es conveniente usar valores grandes de  $\alpha$ , ya que si en el primer muestreo sobre  $R_S$  ya se consiguen suficientes muestras representativas del espacio libre de  $\mathcal{C}$  a partir de ese momento la región  $V_S$  se ajustará correctamente y entonces conviene sacar muestras de ella. Por el contrario, si el número de muestras  $k$  es pequeño, entonces  $\alpha$  debe ser menor que 0,5 para primar el muestreo en  $R_S$ , ya que si en la primera iteración no se consiguen muestras representativas del espacio libre la región  $V_S$  no se ajustará correctamente y por tanto su muestreo no cubrirá todo el espacio de interés, por lo que resulta más conveniente dar prioridad al muestreo en  $R_S$ . No obstante, en cualquier caso si  $\alpha$  es excesivamente pequeño la región  $V_S$  estará poco explotada y los resultados se aproximarán a los de un muestreo uniforme en  $R_S$ .

La aplicación de esta propuesta de muestreo en el problema de planificación de conjuntos brazo-mano, se realiza mediante un PRM concebido para capturar sólo la parte de  $\mathcal{C}$  relevante para conectar dos configuraciones,  $c_{ini}$  and  $c_{goal}$ , siendo  $c_{goal}$  una configuración de prensión o de pre-prensión. Entonces se define la región  $R_S$  como la región de  $\mathcal{SC} = \mathcal{SC}^h \times \mathcal{C}^a$  formada por aquellas configuraciones tales que la posición del robot (es decir las coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  de la muñeca) se halla a una distancia máxima  $\delta_R$  de la posición de la muñeca en  $c_{goal}$ , y se escoge  $\alpha = 0,5$ . Nótese que,

TABLA I  
EVALUACIÓN DEL USO DE PMDS.

PMDs	# muestras Media	# nodos	
		Media	Int. Conf. del 95%
Sin (16 GDL)	63	21	[12,9, 28,3]
Con (6 GDL)	25	15	[12,0, 17,9]

TABLA II

COMPARACIÓN ENTRE EL ENFOQUE PROPUESTO USANDO PMDS Y EL USO DE TODO EL ESPACIO DE CONFIGURACIONES.

Espacio de búsqueda	$\mathcal{SC}^h \times \mathcal{C}^a$	$\mathcal{C}^h \times \mathcal{C}^a$
Tiempo de cálculo [s]	10,39	915,28
Núm total de muestras ( <i>num.Samples</i> )	698,82	7274,78
Núm. Total de nodos del PRM	29,18	567,22
Nodos en el camino solución	3,66	3,22

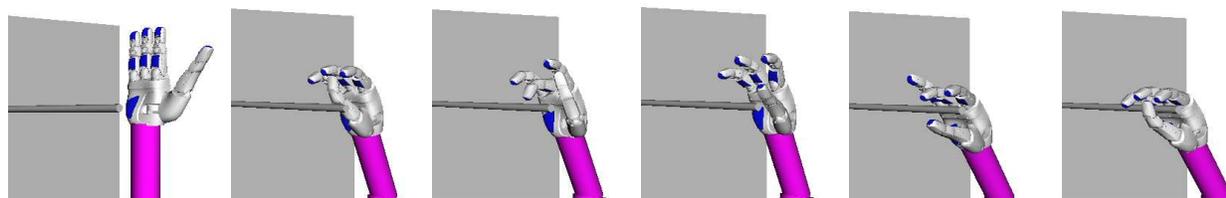
a diferencia del uso del PCA presentado en la Sección IV para la obtención de las PMDs aplicadas a configuraciones de la mano, ahora el PCA se aplica a configuraciones brazo-mano. El método propuesto permite sobremuestrear cerca de  $c_{goal}$  cubriendo la zona libre de manera adaptativa mediante sucesivos recálculos del PCA, esto ha permitido resolver satisfactoriamente problemas en los que la configuración final estaba muy constreñida y en los que el camino solución requiere pasar por pasillos estrechos siendo necesario un movimiento coordinado de las articulaciones del brazo y de la mano.

## VI. EXPERIMENTACIÓN

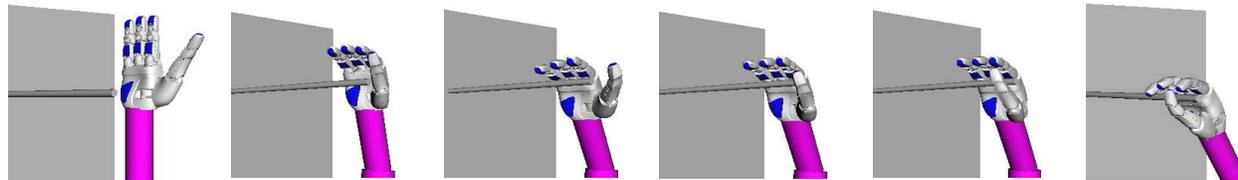
En esta sección se muestran resultados de las propuestas planteadas, tanto en simulación como en ejecución real. En la Figura 5 se ilustra el enfoque básico (en simulación) aplicado a una tarea simple en la que un robot de 3 GDL está equipado con la mano mecánica SAH. En la fila superior se muestran fotogramas del camino solución obtenido mediante un PRM generado en un espacio de 16 GDL (13 de la mano y 3 del robot). En la fila inferior se muestran fotogramas del camino solución obtenido mediante un PRM generado en un subespacio de 6 GDL (3 PMDs que capturan el acoplamiento de los grados de libertad de la mano, 3 GDL del robot). Puede observarse que el uso de los PMDs permite la obtención de movimientos con posturas más parecidas a las de los humanos. Además se obtiene la solución con un menor número de nodos, tal como se ve en la Tabla I, lo que redundará en un menor coste computacional.

En la Figura 6 se muestran fotogramas tanto de la simulación como de la ejecución real de una tarea en las que la configuración final de prensión tiene una holgura pequeña que requiere que el camino desde la configuración inicial involucre movimientos de los dedos para conseguir no colisionar con el entorno. El planificador usa un número incremental de PMDs. Como se puede apreciar los movimientos tienen apariencia humana y, tal como se observa en la Tabla II, el enfoque es más eficiente que usando la planificación en todo el espacio de configuraciones.

En la Figura 7 se muestran fotogramas tanto de la simulación como de la ejecución real de una tarea en la que se ha añadido la restricción de orientación de la muñeca. Se



a) Solución encontrada usando un PRM generado en un espacio de 16 GDL.



b) Solución encontrada usando un PRM generado en un subespacio de 6 GDL definido mediante PMDs.

Fig. 5. Simulación de las soluciones halladas con distintos PRMs en la que se aprecia como el uso de PMDs permite la obtención de movimientos más parecidos a los de la mano humana.

TABLA III

COMPARACIÓN DEL USO DE RESTRICCIONES EN LA ORIENTACIÓN DE LA MUÑECA

Restricciones	Éxito	# Nodos	Tiempo de Muestreo (s)	Tiempo Total (s)
Con	100%	90 ± 71	8.9 ± 6.7	85 ± 68
Sin	62%	37 ± 9	169 ± 85	198 ± 80

consigue una mejora en el desempeño (Tabla III), así como en la apariencia humana de los movimientos.

Finalmente, la Figura 8 muestra fotogramas de la ejecución en simulación de una tarea en la que la configuración final está muy constreñida (la holgura es muy pequeña) y para la que ha sido necesario el uso de un planificador con reducción del tamaño de la región de búsqueda. El enfoque propuesto encontró solución el 70% de las veces (fijando un número máximo de muestras en 4.000), mientras que el problema no pudo resolverse con éste número de muestras usando un muestreo Gaussiano [24] que sesga las muestras hacia configuraciones cercanas a los obstáculos.

## VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se han presentado técnicas que permiten aplicaciones eficientes de planificadores de trayectorias basados en técnicas de muestreo para generar movimientos de un conjunto mano-brazo que tenga que actuar en entornos con obstáculos que pueden imponer fuertes restricciones en la búsqueda de movimientos sin colisión. En este sentido las propuestas toman su mayor relevancia cuando la mano se acerca a un objeto para su sujeción y manipulación. Asimismo, la apariencia antropomorfa de las posturas resultantes es un valor añadido de los planificadores propuestos. Las propuestas se han validado en simulación y se han aplicado con éxito en entornos reales (las tareas planteadas tienen suficiente holgura como para poder negligir las incertidumbres que las afectan).

En conclusión, el enfoque seguido es válido y puede adaptarse a distintos problemas de prensión y manipulación de objetos. Como trabajo futuro se está pensando en cómo tener en cuenta la incertidumbre, y en extender la idea a

aplicaciones de prensión y manipulación que involucren dos conjuntos mano-brazo y por los tanto el número de GDL se duplique con respecto al problema ya de por sí complicado de un único elemento prensor.

## REFERENCIAS

- [1] E. Peña, J. Yang, and K. Abdel-Malek, "Santos<sup>TM</sup> hand: A 25-degree-of-freedom model," in *Proc. of SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering*, Iowa City, Iowa, USA, June 2005.
- [2] S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. F. Knutti, and K. B. Biggers, "The UTAH/M.I.T. dextrous hand: Work in progress," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 3, no. 4, pp. 21–50, December 1984.
- [3] A. Caffaz and G. Cannata, "The design and development of the DIST-Hand dextrous gripper," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, 1998, pp. 2075–2080.
- [4] J. P. Gazeau, S. Zehloul, M. Arsicault, and J. P. Lallemand, "The LMS hand: force and position controls in the aim of the fine manipulation of objects," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, 2001, pp. 2642–2648.
- [5] J. Butterfass, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, and G. Hirzinger, "Design and experiences with DLR hand II," in *Proc. of the World Automation Congress*, vol. 15, 2004, pp. 105–110.
- [6] R. Suárez and P. Grosch, "Mechanical hand MA-I as experimental system for grasping and manipulation," in *VideoProc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, April 2005.
- [7] G. A. Bekey, R. Tomovic, and I. Zeljkovic, *Control architecture for the Belgrade/USC hand*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1990, pp. 136–149.
- [8] M. S. Ali, K. J. Kyriakopoulos, and H. E. Stephanou, "The kinematics of the Anthrobot-2 dextrous hand," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, 1993, pp. 705–710.
- [9] L.-R. Lin and H.-P. Huang, "Mechanism design of a new multifingered robot hand," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 2, 1996, pp. 1471–1476.
- [10] C. S. Lovchik and M. A. Diftler, "The Robonaut hand: a dextrous robot hand for space," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 2, 1999, pp. 907–912.
- [11] H. Kawasaki, T. Komatsu, and K. Uchiyama, "Dextrous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 3, pp. 296–303, 2002.
- [12] Shadow Robot Company, "Design of a dextrous hand for advanced claw applications," in *Climbing and Walking Robots and the Supporting Technologies for Mobile Machines*, 2003, pp. 691–698.
- [13] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, and C. Melchiorri, "Development of UB hand 3: Early results," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2005, pp. 4488–4493.
- [14] A. Bicchi, "Hands for dextrous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 652–662, 2000.

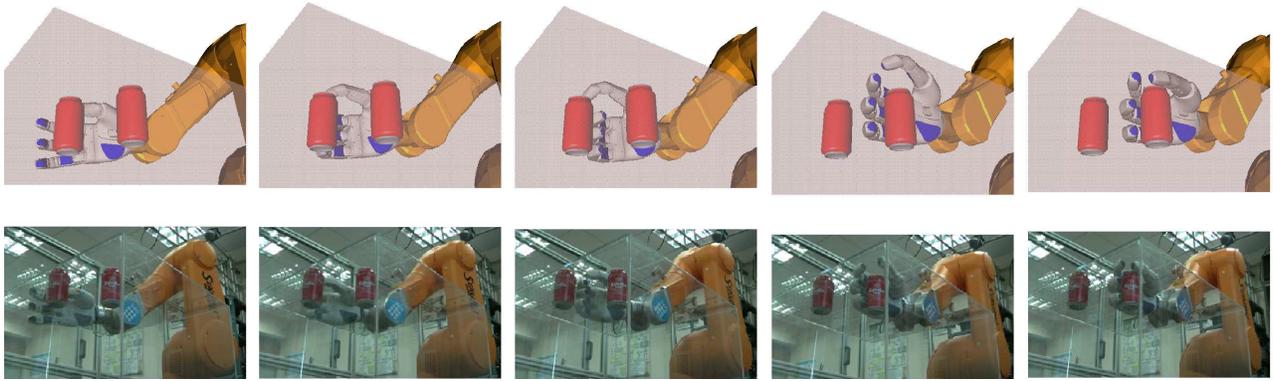


Fig. 6. Simulación y ejecución real de un camino hallado con un número creciente de PMDs.

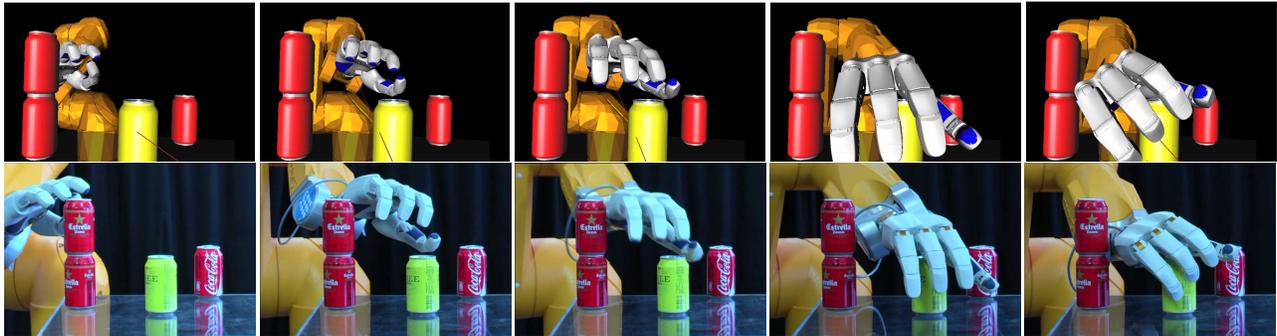


Fig. 7. Simulación y ejecución real de un camino hallado con un número incremental de PMDs y con restricciones en la orientación de la muñeca.

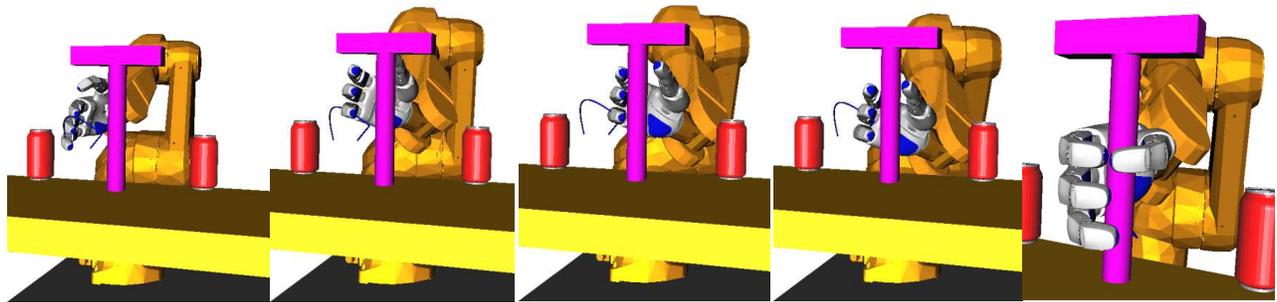


Fig. 8. Simulación de una tarea en la que la configuración final está muy constreñida.

- [15] L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri, and G. Vassura, "How far is the human hand? a review on anthropomorphic robotic end-effectors," University of Bologna, Tech. Rep., 2004.
- [16] H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki, and S. Thrun, *Principles of Robot Motion*. The MIT Press, 2005.
- [17] L. E. Kavraki and J.-C. Latombe, "Randomized preprocessing of configuration for fast path planning," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, 1994, pp. 2138–2145.
- [18] J. J. Kuffner and S. M. LaValle, "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000, pp. 995–1001.
- [19] M. H. O. Roland Geraerts, "Sampling and node adding in probabilistic roadmap planners," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, pp. 165–173, 2006.
- [20] J. P. van der Berg and M. H. Overmars, "Using workspace information as a guide to non-uniform sampling in probabilistic roadmap planners," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 24 (12), pp. 1055–1071, 2005.
- [21] H. Kurniawati and D. Hsu, "Workspace-based connectivity oracle: An adaptive sampling strategy for PRM planning," in *Algorithmic Foundations of Robotics VII*, S. Akella and et.al., Eds. Springer-Verlag, 2006.
- [22] L. E. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe, and M. K. Overmars, "Probabilistic roadmaps for path planning in high - dimensional configuration spaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 4, pp. 566–580, August 1996.
- [23] D. Hsu, G. Sanchez-Ante, and Z. Sun, "Hybrid PRM sampling with a cost-sensitive adaptive strategy," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2005, pp. 3874 – 3880.
- [24] V. Boor, M. H. Overmars, and A. F. van der Stappen, "The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1999, pp. 1018–1023.
- [25] D. Hsu, T. Jiang, J. Reif, and Z. Sun, "The bridge test for sampling narrow passages with probabilistic roadmap planners," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2003, pp. 4420–4426.
- [26] J. Cortés and T. Siméon, "Sampling-based motion planning under kinematic loop closure constraints," in *Proc. of the 6th Int. Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 2004, pp. 59–74.
- [27] J. J. Kuffner, S. Kagami, K. Nishiwaki, M. Inaba, and H. In-

- oue, "Dynamically-stable motion planning for humanoid robots," *Autonomous Robots*, vol. 12, no. 1, pp. 285–300, 2002.
- [28] D. Berenson, S. Srinivasa, D. Ferguson, and J. Kuffner, "Manipulation planning on constraint manifolds," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2009, pp. 625 – 632.
- [29] R. Murrieta-Cid, B. Tovar, and S. Hutchinson, "A sampling-based motion planning approach to maintain visibility of unpredictable targets," *Autonomous Robots*, vol. 19, no. 3, pp. 285–300, 2005.
- [30] A. Rodríguez, A. Pérez, J. Rosell, and L. Basañez, "Sampling-based path planning for geometrically-constrained objects," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2009, pp. 2074–2079.
- [31] M. Stilman, "Global manipulation planning in robot joint space with task constraints," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 576–584, june 2010.
- [32] I. Jolliffe, *Principal Component Analysis*. Upper Saddle River, NJ, USA: Springer Series in Statistics, 2002.
- [33] Schunk GmbH & Co. KG, "Schunk anthropomorphic hand," <http://www.schunk.com/>, May 2006.
- [34] A. Pérez and J. Rosell, "A roadmap to robot motion planning software development," *Computer Applications in Engineering Education (doi: 10.1002/cae.20269)*, September 2009.
- [35] J. Fortín and R. Suárez, "General environment for human interaction with a robot hand-arm system and associate elements," in *IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2010, pp. 34–39.
- [36] M. Santello, M. Flanders, and J. F. Soechting, "Postural hand synergies for tool use," *Journal of Neuroscience*, vol. 18, no. 23, pp. 10 105–10 115, December 1998.
- [37] A. Tsoli and O. C. Jenkins, "2D subspaces for user-driven robot grasping," in *Proc. of the RSS 2007 Workshop on Robot Manipulation: Sensing and Adapting to the Real World*, 2007.
- [38] M. T. Ciocarlie and P. K. Allen, "Hand posture subspaces for dexterous robotic grasping," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 7, pp. 851–867, July 2009.
- [39] J. Rosell, R. Suárez, C. Rosales, J. A. García, and A. Pérez, "Motion planning for high DOF anthropomorphic hands," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2009, pp. 4025–4030.
- [40] J. Rosell, R. Suárez, C. Rosales, and A. Pérez, "Autonomous motion planning of a hand-arm robotic system based on captured human-like hand postures," *Autonomous Robots*, vol. 31, no. 1, pp. 87–102, 2011.
- [41] R. Suárez, J. Rosell, A. Pérez, and C. Rosales, "Efficient search of obstacle-free paths for anthropomorphic hands," in *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 1773–1778.
- [42] J. Rosell, R. Suárez, A. Pérez, and C. Rosales, "Including virtual constraints in motion planning for anthropomorphic hands," in *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Assembly and Manufacturing*, 2011.
- [43] J. Rosell, L. Cruz, R. Suárez, and A. Pérez, "Importance sampling based on adaptive Principal Component Analysis," in *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Assembly and Manufacturing*, 2011.