

Revisión del estado del arte sobre robots manipuladores móviles

Gastón H. Salazar-Silva*, Jaime Álvarez Gallegos[†] y Marco A. Moreno-Armendáriz[‡] *Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas-IPN

Av. Instituto Politécnico Nacional 2580, Col. La Laguna Ticoman, Delegación Gustavo A. Madero C.P. 07340, Ciudad de México, D.F., correo-e: ghsalazar@ipn.mx, teléfono: 5729-6000 ext. 56525[†]Secretaría de Investigación y Posgrado-IPN [‡]Centro de Investigación en Computación-IPN

Resumen—En el presente trabajo se reporta una revisión de la literatura existente con respecto a los manipuladores móviles, limitando la investigación a resultados en el área de control donde el movimiento de los manipuladores móviles es simultáneo en la base móvil y el brazo manipulador; además sólo se consideran los manipuladores móviles que son impulsados por ruedas sin deslizamiento. Se clasifica a la literatura de acuerdo a los siguientes criterios: el tipo de manipulador móvil, el tipo de tareas que realizan los manipuladores móviles, el tipo de modelo matemático usado para describir el comportamiento de los manipuladores móviles, el tipo de control usado, por el tipo de planificación utilizado y el tipo de validación realizada.

Palabras clave: Robots móviles, robots manipuladores, manipuladores móviles.

I. INTRODUCCIÓN

Un robot manipulador móvil consiste en un robot manipulador montado sobre una base que es un robot móvil. Los manipuladores móviles tienen varias ventajas con respecto a los manipuladores estacionarios. Por ejemplo, un manipulador móvil tiene un espacio de trabajo de mayores dimensiones que el espacio de trabajo de un manipulador estacionario (Korayem *et al.* 2010, Liu y Liu 2009).

En contraste con un manipulador estacionario que usualmente sólo tiene restricciones cinemáticas holónomas, los robots manipuladores móviles poseen restricciones cinemáticas no holónomas, lo cual presenta un reto ya que existe una relación entre las restricciones cinemáticas y la controlabilidad de un robot móvil (De Luca y Oriolo 1995).

En el presente trabajo se reporta una revisión de la literatura existente con respecto a los manipuladores móviles, limitando la investigación a resultados en el área de control. No se consideran trabajos donde sólo se presentan plataformas de trabajo, como en Bouzouia y Rahiche (2009), ni se consideran trabajos donde solamente se estudia la cinemática o dinámica del manipulador móvil, como en Bayle *et al.* (2003).

Por otra parte, para la investigación sólo se consideran resultados donde el movimiento de los manipuladores móviles es simultáneo en la base móvil y el brazo manipulador. Este esquema se denomina mover-y-manipular. Otro esquema posible es mover-después-manipular, el cual no es analizado

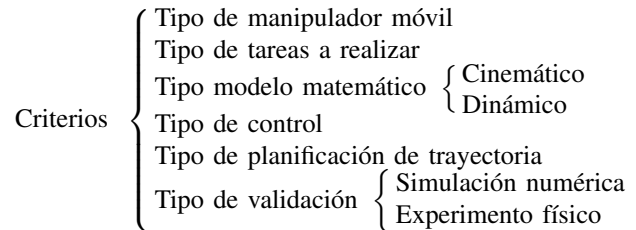


Figura 1. Criterios para clasificar la literatura revisada.

en el presente trabajo. Ejemplos de este enfoque son Wang *et al.* (2008), que se concentra en el movimiento de la base móvil, y Joshi y Desrochers (1986) y Yu *et al.* (2008) que se concentran en el movimiento del brazo manipulador.

Además, para los fines de esta revisión sólo se consideran los manipuladores móviles que son impulsados por ruedas sin deslizamiento. Los sistemas que utilicen otras técnicas de impulsión no están siendo considerados, tales como orugas (Stentz *et al.* 1999, Liu y Liu 2007).

Bajo estas limitaciones, de los 153 artículos sujetos a revisión, sólo 27 se consideraron para ser clasificados en el presente trabajo de acuerdo con los criterios indicados en la Figura 1.

Este trabajo de revisión se divide en siete secciones. En la sección II se presentan los resultados en la literatura clasificándolos de acuerdo al tipo de manipulador móvil, esto es de acuerdo a las restricciones cinemáticas que presentan su diseño mecánico.

En la sección III se presentan los resultados existentes en base al tipo de tareas que realizan los manipuladores móviles. Aunque la tarea primordial de un manipulador móvil es manipular, pueden existir tareas complementarias a realizar al mismo tiempo.

En la sección IV se clasifican los resultados de acuerdo al modelo matemático usado para describir el comportamiento de los manipuladores móviles. En general se consideran dos tipos de descripciones: cinemáticas y dinámicas. Un hecho importante es que varios trabajos consideran inicialmente que sus manipuladores móviles tienen restricciones no holónomas y sin embargo no se consideran a la hora de realizar el modelo .

En la sección V se presentan los tipos de controles usados en la literatura para gobernar a los manipuladores móviles.

En la sección VI se exponen los resultados existentes en la literatura con respecto a la planificación de trayectorias de manipuladores holónomos.

En la sección VII se clasifican los resultados de la literatura revisada por el tipo de validación realizada, esto es si los resultados sólo se simularon numéricamente o si se realizaron experimentos reales.

Finalmente en la sección VIII se presentan las conclusiones del reporte.

II. TIPOS DE MANIPULADORES MÓVILES

Un manipulador móvil usualmente consta de dos subsistemas separados: el robot móvil y el robot manipulador. Ambos subsistemas se pueden dividir como holónomos, denotados h , o no holónomos, denotados nh , a partir de su diseño. Con base a esto, en Mazur y Szakiel (2009) se propone una clasificación de los manipuladores móviles en cuatro posibles casos, de acuerdo con las posibles restricciones a las dinámicas de la base móvil y el brazo manipulador, tal como aparece en la Tabla I.

TABLA I
TIPOS DE MANIPULADORES MÓVILES DE ACUERDO A SUS
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.

Tipo de manipulador	Descripción
(h, h)	Base holónoma y manipulador holónomo
(h, nh)	Base holónoma y manipulador no holónomo
(nh, h)	Base no holónoma y manipulador holónomo
(nh, nh)	Base no holónoma y manipulador no holónomo

El primer caso se tiene que el robot móvil y el manipulador tienen restricciones holónomas; en este caso se clasifican como manipuladores móviles (h, h) , es decir móvil holónomo y manipulador holónomo. Ejemplo es Xu *et al.* (2009), Xu *et al.* (2008) y Korayem *et al.* (2007). Un ejemplo de un robot (h, h) es un manipulador móvil cuya base móvil es omnidireccional y redundantemente actuada (Xu *et al.* 2008).

En Korayem *et al.* (2007) se presenta un caso especial del tipo (h, h) , ya que la base del manipulador móvil sólo se mueve sobre un eje y no sobre el plano, es decir sólo en línea recta. El mismo trabajo usa un brazo manipulador compuesto por dos eslabones flexibles.

El caso más trabajado en la literatura es el de móvil no holónomo y el manipulador holónomo, denotado (nh, h) . Una explicación de este hecho es que las bases móviles actuadas más simples de construir son no holónomas y los brazos manipuladores usualmente son holónomos. Ejemplos de trabajos que utilizan este tipo de manipuladores son Hamner *et al.* (2010), Lee y Lee (2008), Fang *et al.* (2008), Liu y Liu (2009), Korayem *et al.* (2010), Mazur y Szakiel (2009), Abeygunawardhana y Murakami (2009), Boukattaya *et al.* (2009), Bu y Xu (2009), Bu y Zhang (2009), Ellekilde y Christensen (2009), Hong y Qing-xuan (2009), Li *et al.* (2009), White *et al.* (2009), Farkhatdinov *et al.* (2008), Fujii *et al.* (2007), Eslamy y Moosavian (2009),

Moosavian y Eslamy (2008), Tai y Murakami (2008) y Ge *et al.* (2008).

Un caso a resaltar es el que aparece en Tai y Murakami (2008), donde la base móvil sólo tiene dos ruedas diferenciales y no cuenta con un apoyo, tal como podría ser una rueda castor. Este tipo de manipulador presenta problemas especiales e interesantes. Por otro lado, si bien el manipulador móvil es (nh, h) , los autores lo modelan como si la base fuera del tipo holónoma, ya que sólo se desplaza en ese trabajo en un eje.

Por otro lado, recientemente, ha aparecido el uso de manipuladores con restricciones no holónomas (Nakamura *et al.* 2001). Considerando al móvil también como un sistema no holónomo, esto es un manipulador móvil del tipo (nh, nh) , se han desarrollado una serie de trabajos como Mazur y Szakiel (2009) y Mazur (2010).

En la Tabla II se muestra en resumen la cantidad de trabajos que aparecen en la literatura revisada. Es importante notar que para el caso de móvil holónomo y manipulador no holónomo no se encontró ejemplos en la literatura revisada.

TABLA II
FRECUENCIA CON QUE APARECEN LOS DIFERENTES TIPOS DE
MANIPULADORES MÓVILES EN LA LITERATURA REVISADA.

Tipo de manipulador	Frecuencia (%)
(h, h)	11.5
(h, nh)	0
(nh, h)	77.0
(nh, nh)	11.5

III. TAREAS QUE REALIZAN LOS MANIPULADORES MÓVILES

La principal tarea de un manipulador móvil es la manipulación de objetos así como sujetarlos. Todos los trabajos revisados indican implícitamente esta tarea, pero no todos lo plantean como tarea a realizar. En particular, en Fang *et al.* (2008) se considera el problema de manipulación, mientras en Lee y Lee (2008) consideran el problema de sujeción. En Fujii *et al.* (2007) se estudian el problema de la manipulación cooperativa usando agarres no rígidos del objeto a manipular.

Otra tarea fundamental es el ensamble de componentes, la cual es ejemplificada en el problema de insertar un perno en un orificio. En Hamner *et al.* (2010) se desarrolla dicha tarea usando control servo-visual y control de fuerza.

En un manipulador móvil existe una interacción entre la base móvil y el brazo manipulador. El centro de masa del manipulador móvil cambia constantemente en función del desplazamiento del manipulador móvil lo cual puede producir oscilaciones mecánicas en el sistema. En Abeygunawardhana y Murakami (2009) se propone un control para el manipulador móvil de tal manera que se reduzca la oscilación del brazo manipulador. En Korayem *et al.* (2010) se estudia el problema de la estabilidad en el transporte de una carga y como controlar el manipulador móvil para mantener dicha estabilidad. En Tai y Murakami (2008) se tiene que la base del manipulador móvil sólo cuenta con

dos ruedas en configuración diferencial y una de las tareas a realizar por el control es estabilizar la base, toman en cuenta los cambios que pudiera haber en el centro de gravedad a causa del manipulador.

Por otro lado, que el manipulador móvil sea capaz de realizar una tarea mientras evade un obstáculo se propone en Liu y Liu (2009).

En Farkhatdinov *et al.* (2008) estudian el problema de teleoperación bilateral. Se utilizan dos controles disociados, uno de posición para el brazo manipulador y uno de control de razón de movimiento para la base móvil.

En ocasiones, un manipulador móvil requiere realizar más de una tarea a la vez, como por ejemplo en Boukattaya *et al.* (2009) donde se resuelve la redundancia en la dinámica del manipulador usando proyecciones y el espacio nulo, y utilizan un control difuso para cerrar el lazo. Otro ejemplo es Tai y Murakami (2008), donde la base móvil sólo tiene dos ruedas que operan de manera diferencial y no tiene ningún mecanismo para su apoyo; por lo tanto deben satisfacer al menos dos tareas al mismo tiempo, una de las cuales es estabilizar la base.

IV. CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE MODELO

En el control de manipuladores móviles se utilizan modelos cinemáticos y dinámicos. En el modelo cinemático, no interesa el efecto directo de las fuerzas en el comportamiento del manipulador móvil. En Bayle *et al.* (2003) se propone un método para analizar la cinemática en esta clase de robots. En Hamner *et al.* (2010), Yang y Brock (2010), Ellekilde y Christensen (2009) y Shu-ying *et al.* (2009) se reporta el uso de modelos cinemáticos para el control de manipuladores móviles.

En cuanto al uso de modelos dinámicos en el control del manipulador móvil, permiten considerar el efecto de las fuerzas sobre el manipulador móvil así como determinar la inercia que existe en éste. En la literatura aparecen los siguientes trabajos que utilizan este tipo de modelo Mazur y Szakiel (2009), Mazur (2010), Liu y Liu (2009), Fang *et al.* (2008), Boukattaya *et al.* (2009), White *et al.* (2009), Farkhatdinov *et al.* (2008), Eslamy y Moosavian (2009) y Moosavian y Eslamy (2008).

Casos particulares con este tipo de modelos son cuando consideran otros factores en el modelado, como en Eslamy y Moosavian (2009) donde no sólo realiza el modelo dinámico tomando en cuenta las restricciones no holónomas, sino que además considera que las ruedas tienen un sistema de suspensión. Otro caso es cuando se considera la carga en el modelo dinámico, como por ejemplo en Korayem *et al.* (2010).

Por otro lado, una categoría importante de modelos para manipuladores móviles del tipo (nh, h) son cuando no se consideran las restricciones no holónomas en el modelo del sistema. El problema con este enfoque es que trasladan las restricciones cinemáticas a la generación de trayectorias, y por lo tanto dependen de que las trayectorias sean factibles para esta clase de manipuladores móviles. Este enfoque se utiliza mucho cuando se consideran que varias tareas de

deben efectuar simultáneamente. Ejemplos son Abeygunawardhana y Murakami (2009), Bu y Xu (2009), Bu y Zhang (2009), Tai y Murakami (2008), Ge *et al.* (2008), Li *et al.* (2009) y Fujii *et al.* (2007).

Un caso especial es Tai y Murakami (2008), donde usan una base móvil con dos ruedas en una configuración diferencial y no cuentan con algún sistema de apoyo, como podría ser una rueda castor. El modelo planteado es dinámico pero no consideran las restricciones no holónomas, y consideran que los movimientos de la base móvil son despreciables, ya que su tarea principal es la estabilización de la base.

Otro caso particular es modelar la manipulación de un objeto por medio de un conjunto de manipuladores móviles. En Li *et al.* (2009) se obtiene el modelo dinámico de un par de manipuladores móviles considerando las restricciones cinemáticas para describir una cadena cinemática cerrada entre los dos manipuladores móviles y un objeto que manipulan.

En Fujii *et al.* (2007) usan un agarre no rígido para realizar la manipulación cooperativa; esto implica retardos e histéresis en la medición de las fuerzas que ocurren en la manipulación y que tienen efectos sobre el control.

La última categoría son para manipuladores móviles del tipo (h, h) donde los modelos reportados son dinámicos. Por ejemplo, en Korayem *et al.* (2007), Xu *et al.* (2009) y Xu *et al.* (2008) se reporta el uso del modelo dinámico para un manipulador móvil omnidireccional.

En particular Korayem *et al.* (2007) se reporta un manipulador móvil donde la base se mueve de manera unidireccional, es decir sólo en línea recta, y por lo tanto es del tipo (h, h) . El brazo manipulador consiste en dos eslabones flexibles. El modelo usado es dinámico y considera la flexibilidad en los eslabones del brazo manipulador; se utilizó el método de elemento finito para modelar los eslabones.

TABLA III
FRECUENCIA CON QUE APARECEN LOS DIFERENTES TIPOS DE
MODELOS EN LA LITERATURA REVISADA.

Tipo de modelo	Frecuencia (%)
Cinemático	21.0
Dinámico de un manipulador (nh, h) considerando restricciones no holónomas	47.6
Dinámico de un manipulador (nh, h) sin considerar restricciones no holónomas	15.7
Dinámico de un manipulador (h, h)	15.7

En la Tabla III se resume los tipos de modelos usados para control. Es importante notar que la mayoría de los trabajos revisados utilizan modelos dinámicos y que consideran las restricciones holónomas.

V. CLASIFICACIÓN POR TIPO DE CONTROL

En esta sección se consideran fundamentalmente dos criterios de clasificación: por objetivo de control y por tipo de control.

Es importante notar que sólo se consideraron trabajos donde el control actúa de manera simultánea sobre la base y sobre el brazo manipulador. Esto no implica que

sólo se usa un control monolítico, sino puede existir un desacoplamiento del control.

V-A. *Objetivo de control*

El objetivo de control más estudiado en la literatura es el seguimiento de trayectorias. Esto se debe a que es la base para resolver varias de las tareas anteriormente descritas. Trabajos que indican este objetivo son Mazur y Szakiel (2009), Mazur (2010), Yang y Brock (2010), Korayem *et al.* (2010), Boukattaya *et al.* (2009), Bu y Xu (2009), Bu y Zhang (2009), Ellekilde y Christensen (2009), Hong y Qing-xuan (2009), Li *et al.* (2009), Shu-ying *et al.* (2009), Fujii *et al.* (2007), Eslamy y Moosavian (2009), Moosavian y Eslamy (2008), Xu *et al.* (2009), Ge *et al.* (2008), Xu *et al.* (2008), Korayem *et al.* (2007), White *et al.* (2009), Tai y Murakami (2008), Hamner *et al.* (2010) y Lee y Lee (2008).

Por otro lado, usualmente existe redundancia cinemática en los manipuladores móviles. Este hecho se puede aprovechar para realizar seguimiento de trayectoria con desacoplamiento entra la tarea principal y posibles tareas con menor prioridad, tal como lo presentan White *et al.* (2009), Tai y Murakami (2008).

En Hamner *et al.* (2010) y Lee y Lee (2008) usan información visual para seguir una trayectoria, es decir servo-visual.

Por otro lado, la tarea puede ser descrita por medio de la fuerza necesaria para realizar una tarea, y por lo tanto hay que mantener una descripción variante en el tiempo de dicha fuerza, tal como se presenta en Hamner *et al.* (2010).

Otro objetivo de control estudiado es el problema de regulación se reporta en Abeygunawardhana y Murakami (2009) para reducir la oscilación mecánica del manipulador móvil, y en Tai y Murakami (2008) para estabilizar la base.

Un problema relacionado con el seguimiento de trayectorias es el de mantener una formación de manipuladores móviles, tal como se reporta en Fang *et al.* (2008).

TABLA IV
FRECUENCIA CON QUE APARECEN LOS DIFERENTES TIPOS DE
OBJETIVOS DE CONTROL EN LA LITERATURA REVISADA.

Tipo de validación	Frecuencia (%)
Seguimiento de trayectoria	88
Regulación	12

En la tabla IV aparece con que frecuencia aparece en la literatura revisada cada uno de los objetivos de control. Es importante notar que la mayoría de los trabajos realizados hacen seguimiento de trayectorias.

V-B. *Tipo de control*

Un problema que se resuelve en la literatura reportada es el uso de controles para desacoplar la dinámica del sistema. Por ejemplo, el control por resolución de la razón de movimiento es usado por Hamner *et al.* (2010), Yang y Brock (2010) y White *et al.* (2009) con este fin. Este tipo de control usa la proyección sobre el espacio diestro

del manipulador móvil y su aniquilador para eliminar la redundancia cinemática del manipulador móvil y poder desacoplar tareas y se cierra el lazo de control por medio de una retroalimentación lineal. Por otro lado, en Boukattaya *et al.* (2009) se utilizan este tipo de proyecciones sólo para resolver la redundancia en el manipulador móvil y utilizan un control difuso de posición para cerrar el lazo de control.

Otro enfoque en el desacoplamiento de manipuladores móviles se reporta en Bu y Xu (2009) y Bu y Zhang (2009) donde usan compensación del par y una retroalimentación lineal.

En otros casos se considera que el sistema es desacoplado dinámicamente, como se presenta en En Mazur y Szakiel (2009) y Mazur (2010) se usa un control del tipo *backstepping*, ya que consideran el modelo dinámico del manipulador móvil se puede desacoplar entre la base móvil y el brazo manipulador. En Farkhatdinov *et al.* (2008) utilizan dos controles disociados, uno de posición para el brazo manipulador y control de razón de movimiento para la base móvil.

Otros esquemas de control usados son el óptimo y el adaptable. Por ejemplo, en Korayem *et al.* (2010) propone el uso de control óptimo para realizar el seguimiento de trayectorias. En cuanto al control adaptable, en Fang *et al.* (2008), Li *et al.* (2009) y Liu y Liu (2009) se usa; en particular Li *et al.* (2009) realiza control adaptable robusto centralizado de posición y fuerza para realizar la tarea de manipulación cooperativa con dos manipuladores móviles. En cuanto a Liu y Liu (2009) se usa un control adaptable robusto basado en redes neuronales.

En Abeygunawardhana y Murakami (2009) usan el control por razón de resonancia para reducir las oscilaciones mecánicas que aparecen bajo ciertas condiciones en el manipulador móvil.

En Ellekilde y Christensen (2009) proponen una extensión del método de campos potenciales llamado método de sistema dinámico. Usan un conjunto de ecuaciones diferenciales, estableciendo un comportamiento dinámico para definir la trayectoria del manipulador móvil.

En Hong y Qing-xuan (2009), Shu-ying *et al.* (2009) y Liu y Liu (2009) se utilizan redes neuronales para modelar el sistema o para controlarlo. En Hong y Qing-xuan (2009) se modela la incertidumbre del manipulador móvil por medio de una red neuronal y el control se realiza por medio de modos deslizantes. En cuanto a usar control por medio de redes neuronales, en Shu-ying *et al.* (2009) realizan control jerárquico, el cual se aplica para priorizar el orden de las tareas a ejecutar. Por otro lado, en Liu y Liu (2009) utilizan un controlador adaptable robusto con redes neuronales.

En Farkhatdinov *et al.* (2008) usan la propiedad de pasividad en el dominio del tiempo para desarrollar dos controles disociados, uno de posición para el brazo manipulador y un control de razón de movimiento para la base móvil. Además, en el maestro se tiene control de fuerza.

En Fujii *et al.* (2007) se emplea un control líder-seguidor basado en compliancia en combinación con un estimador lineal, el cual se usa para determinar la trayectoria a seguir por parte del seguidor.

En Eslamy y Moosavian (2009), Moosavian y Eslamy (2008) usan el control de Impedancia Múltiple.

En Xu *et al.* (2009) y Xu *et al.* (2008) se usa modos deslizantes basados en redes neuronales robustas.

En Tai y Murakami (2008) se usan un conjunto de controles combinados por del espacio nulo. Un control es para la estabilización de la base por medio de péndulo invertido y control del centro de gravedad. El otro control es para satisfacer la tarea a ejecutar.

En Ge *et al.* (2008) el control propuesto es por medio de modos deslizantes y se descompone en dos partes: 1) el control de la base móvil es por medio de modos deslizantes, y 2) el control del manipulador es por medio de modos deslizantes del tipo terminal no singular.

Korayem *et al.* (2007) Los autores usan un manipulador móvil donde la base móvil se mueve de manera unidireccional y el brazo manipulador consiste en dos eslabones flexibles. El control usado fue linealización por retroalimentación.

VI. PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIA

En el caso de robots móviles, la planificación de la trayectoria es un problema importante, ya que las restricciones no holónomas de estos robots no permiten que cualquier trayectoria sea factible. De hecho, ciertos esquemas de control de manipuladores móviles asumen que la trayectoria es factible, como en Abeygunawardhana y Murakami (2009), Bu y Xu (2009), y Bu y Zhang (2009).

Una clase de métodos que se usan para la generación de trayectorias es plantear las trayectorias por medio de movimientos sobre campos potenciales, como se reporta en Korayem *et al.* (2010), Liu y Liu (2009) y Yang y Brock (2010). De hecho, se han propuesto extensiones a estos métodos modelando la trayectoria deseada como un comportamiento dinámico y expresándolo como un conjunto de ecuaciones diferenciales Ellekilde y Christensen (2009).

En Fujii *et al.* (2007) usan un estimador lineal para determinar, en un esquema líder-seguidor, la posición del líder.

VII. CLASIFICACIÓN POR TIPOS DE EXPERIMENTOS

En la literatura se encontró dos tipos de experimentación, una donde sólo se realizan experimentos numéricos, y la otra donde los controles se prueban en sistemas físicos.

La mayoría de los resultados encontrados en la literatura sólo se valida el control por medio de simulaciones numéricas, por ejemplo en Mazur (2010), Liu y Liu (2009), Fang *et al.* (2008), Boukattaya *et al.* (2009), Bu y Xu (2009), Bu y Zhang (2009), Ellekilde y Christensen (2009), Hong y Qing-xuan (2009), Li *et al.* (2009), Shu-ying *et al.* (2009), Farkhatdinov *et al.* (2008), Eslamy y Moosavian (2009), Moosavian y Eslamy (2008), Xu *et al.* (2009), Xu *et al.* (2008), Korayem *et al.* (2007).

Por otro lado, realizar validaciones en sistemas físicos no ha sido muy trabajado y sólo hay pocos ejemplos comparados con la categoría anterior; por ejemplo Yang y Brock

(2010), Korayem *et al.* (2010), Lee y Lee (2008), Abeygunawardhana y Murakami (2009), White *et al.* (2009), Fujii *et al.* (2007), Tai y Murakami (2008).

TABLA V

FRECUENCIA CON QUE APARECEN LOS DIFERENTES TIPOS DE VALIDACIÓN EN LA LITERATURA REVISADA.

Tipo de validación	Frecuencia (%)
Simulaciones numéricas	69.5
Experimentos físicos	30.5

En la Tabla V se presenta una estadística que indica de manera rápida que existen muy pocos resultados experimentales que sustenten las propuestas reportadas en la literatura revisada.

VIII. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un estudio del estado del arte de la literatura con respecto a manipuladores móviles. Se encontraron pocos trabajos que satisfagan las restricciones propuestas. Además se clasificó la literatura conforme a los criterios planteados en la Figura 1.

De acuerdo con la literatura revisada, los modelos dinámicos con restricciones no holónomas son muy usados, pero usualmente no están aplicados a problemas donde requiere satisfacer más de una tarea. Para manejar los problemas con múltiples tareas se utilizan mas bien modelos cinemáticos o modelos dinámicos que no consideran las restricciones no holónomas.

Por otro lado, los trabajos que presentan validación de resultados por vía experimental son pocos comparados con los resultados validados por medio de simulación numérica.

IX. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación cuenta con el apoyo del ICyT-DF por medio del proyecto PIFUTP08-135. Además los autores agradecen el apoyo del Gobierno Mexicano para realizar el presente trabajo, y en particular al CONACyT, al SNI y al Instituto Politécnico Nacional (SIP, COFAA, PIFI y COTEPABE).

REFERENCIAS

- Abeygunawardhana, P.K.W y Toshiyuki Murakami (2009). Workspace control of two wheel mobile manipulator by resonance ratio control. *Proceedings of the 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* pp. 1270–1275.
- Bayle, B., M. Renaud y J.-Y. Fourquet (2003). Nonholonomic mobile manipulators: Kinematics, velocities and redundancies. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **36**(1), 45–63.
- Boukattaya, M., M. Jallouli y T. Damak (2009). Dynamic redundancy resolution for mobile manipulators using position fuzzy controller. En: *Proceedings of the 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*.
- Bouzouia, B. y A. Rahiche (2009). Teleoperation system of the mobile manipulator robot robuter-uhl: Implementation issues. En: *Proceeding of the XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies, 2009. (ICAT 2009)*. Bosnia.
- Bu, C.-W. y L.-X. Zhang (2009). Robust compensation control of mobile manipulator service robot. En: *Proceedings of the 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA 2009)*. Vol. 1. pp. 860–864.

- Bu, Chi-wu y Ke-fei Xu (2009). Robust control of mobile manipulator service robot using torque compensation. En: *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science (ITCS 2009)*. Vol. 2. pp. 69–72.
- De Luca, A. y G. Oriolo (1995). *Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems*. Cap. Modelling and control of nonholonomic mechanical systems. pp. 277–342. Springer.
- Ellekilde, Lars-Peter y Henrik I. Christensen (2009). Control of mobile manipulator using the dynamical systems approach. En: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan. pp. 1370–1376.
- Eslamy, Mahdy y S. Ali A. Moosavian (2009). Control of suspended wheeled mobile robots with multiple arms during object manipulation tasks. En: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan. pp. 3730–3735.
- Fang, Mu, Weidong Chen y Zhijun Li (2008). Adaptive tracking control of coordinated nonholonomic mobile manipulators. En: *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Vol. 17. Seoul, Korea.
- Farkhatdinov, Ildar, Jee-Hwan Ryu y Jury Poduraev (2008). A feasibility study of time-domain passivity approach for bilateral teleoperation of mobile manipulator. En: *International Conference on Control, Automation and Systems 2008*. COEX, Seoul, Korea. pp. 272–277.
- Fujii, Masakazu, Wataru Inamura, Hiroki Murakami, Kouji Tanaka y Kazuhiro Kosuge (2007). Cooperative control of multiple mobile robots transporting a single object with loose handling. En: *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Sanya, China. pp. 816–822.
- Ge, Weimin, Duofang Ye, Wenping Jiang y Xiaojie Sun (2008). Sliding mode control for trajectory tracking on mobile manipulators. En: *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2008. APCAS 2008*. Macao. pp. 1834–1837.
- Hamner, Brad, Seth Koterba, Jane Shi, Reid Simmons y Sanjiv Singh (2010). An autonomous mobile manipulator for assembly tasks. *Autonomous Robots* **28**(1), 131–149.
- Hong, Tang y Yang Qing-xuan (2009). Sliding mode control design of cleaning robot's mobile manipulator used in large condenser based on neural networks. En: *Proceedings of the 2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering*. pp. 446–449.
- Joshi, J. y A. Desrochers (1986). Modeling and control of a mobile robot subject to disturbances. En: *Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 1508–1513.
- Korayem, M. H., S. Firouzy y A. Heidari (2007). Dynamic load carrying capacity of mobile-base flexible-link manipulators: feedback linearization control approach. En: *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007*. Sanya. pp. 2172–2177.
- Korayem, M. H., V. Azimirad, A. Nikoobin y Z. Boroujeni (2010). Maximum load-carrying capacity of autonomous mobile manipulator in an environment with obstacle considering tip over stability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **46**(5-8), 811–829.
- Lee, H. J. y M. C. Lee (2008). Color-based visual servoing of a mobile manipulator with stereo vision. En: *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Vol. 17. Seoul, Korea.
- Li, Zhijun, Pey Yuen Tao, Shuzhi Sam Ge, Martin Adams, y Wijerupage Sardha Wijesoma (2009). Robust adaptive control of cooperating mobile manipulators with relative motion. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B* **39**(1), 103–116.
- Liu, Yugang y Guangjun Liu (2007). Kinematics and interaction analysis for tracked mobile manipulators. En: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007*. San Diego, CA, USA. pp. 267–272.
- Liu, Yugang y Guangjun Liu (2009). On multiple secondary task execution of redundant nonholonomic mobile manipulators. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* **56**(4), 365–388.
- Mazur, Alicja (2010). Trajectory tracking control in workspace-defined tasks for nonholonomic mobile manipulators. *Robotica* **28**, 1–12.
- Mazur, Alicja y Dawid Szakiel (2009). On path following control of nonholonomic mobile manipulators. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* **19**(4), 561–574.
- Moosavian, S. A. A. y M. Eslamy (2008). Object manipulation by multiple arms of a wheeled mobile robotic system. En: *2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*. Chengdu. pp. 1124–1129.
- Nakamura, Y., Woojin Chung y O. J. Sordalen (2001). Design and control of the nonholonomic manipulator. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **17**(1), 48–59.
- Shu-ying, L., D. Ping, C.-J. Ding, M.-L. Zhang y Y.-F. Zhang (2009). The study on dynamic scheduling of mobile manipulator based on mas and neural network. pp. 1821–1826.
- Stentz, Anthony, John Bares, Sanjiv Singh y Patrick Rowe (1999). A robotic excavator for autonomous truck loading. *Autonomous Robots* **7**(2), 175–186.
- Tai, H. y T. Murakami (2008). A control of two wheels driven redundant mobile manipulator using a monocular camera system. En: *15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2008 (M2VIP 2008)*. Auckland. pp. 368–373.
- Wang, Ying, Haoxiang Lang y C. W. de Silva (2008). Visual servo control and parameter calibration for dynamic multi-robot cooperative assembly tasks. En: *IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008*. Qingdao. pp. 635–639.
- White, Glenn D., Rajankumar M. Bhatt, Chin Pei Tang y VenkatĀ. Krovi (2009). Experimental evaluation of dynamic redundancy resolution in a nonholonomic wheeled mobile manipulator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **14**(3), 349–357.
- Xu, Dong, Dongbin Zhao, Jianqiang Yi, Xiangmin Tan y Zonghai Chen (2008). Trajectory tracking control of omnidirectional wheeled mobile manipulators: Robust neural network based sliding mode approach. En: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008*. Pasadena, CA, USA. pp. 1653–1658.
- Xu, Dong, Dongbin Zhao, Jianqiang Yi y Xiangmin Tan (2009). Trajectory tracking control of omnidirectional wheeled mobile manipulators: Robust neural network-based sliding mode approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* **39**(3), 788–799.
- Yang, Yuandong y Oliver Brock (2010). Elastic roadmaps-motion generation for autonomous mobile manipulation. *Autonomous Robots* **28**(1), 113–130.
- Yu, L. B., Q. X. Cao y X. W. Xu (2008). An approach of manipulator control for service-robot fir-1 based on motion imitating. En: *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008. ICIT 2008*. Chengdu. pp. 1–5.