**Universidad de Salamanca**
**Departamento de Informática y Automática.**
**Sistemas Avanzados de Producción**
**Trabajo de Doctorado 2004-2005-.**

# "Agent-Based Control for Fuzzy Behaivor Programming in Robotic Excavation"

**Fei-Yue Wang, Fellow, IEEE. (Agosto, 2004)**

**Nombre: Johanna Echegoyen López**
**DNI: 72707584-F**

# Tabla de Contenido

**RESUMEN** ..... **1**

**INTRODUCCIÓN** ..... **2**

**1) CONTROL BASADO EN AGENTES PARA EXCAVACIÓN** ..... **4**

**2) COORDINACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE AGENTE** ..... **5**

**3) AGENTES DE CONTROL Y PRIMITIVAS DE MOVIMIENTO** ..... **8**

**4) REGLAS DE CONTROL LÓGICO DIFUSO PARA PRIMITIVAS DE MOVIMIENTO DE EXCAVACIÓN ROBÓTICA.** ..... **10**

**5) EXPERIMENTOS DE LABORATORIO** ..... **13**

A. TAREAS DE EXCAVACIÓN SIMPLE ..... 13

B. TAREAS COMPLEJAS DE EXCAVACIÓN ..... 15

**6) COMPARACIÓN CON OTROS ARTÍCULOS CIENTÍFICOS SOBRE EXCAVACIÓN ROBÓTICA** ..... **17**

**CONCLUSIONES** ..... **18**

**BIBLIOGRAFÍA** ..... **19**

# Resumen

Este artículo discute el concepto, formulación e implementación del control basado en agentes para programación difusa de comportamiento en excavación robótica. Se introduce el concepto de Transductores de Redes de Petri para describir la coordinación y especificación de los agentes de control en excavación, y se utilizan reglas de control difuso para implementar primitivas básicas de movimiento.

Se construyó un sistema de excavación prototipo con manipuladores robóticos PUMA y un sensor de esfuerzos/torques.

Se han realizado experimentos, cuyos resultados han demostrado que el método de control propuesto es capaz de adaptarse continuamente y replanificar sus acciones basándose en retroalimentación con sensores, y de completar sus tareas de excavación en ambientes dinámicos y no estructurados.

# Introducción

La excavación de tierra juega un papel esencial en actividades tales como minería, construcción, y en tratamientos de desechos peligrosos. La tendencia reciente hacia una mayor automatización de máquinas de movimiento de tierra tales como tractores, bulldozers, etc, es reflejo de la necesidad de las industrias de mejorar la productividad, la eficiencia, y la seguridad.

Aunque la automatización de removedores de tierra ofrece grandes potenciales pero es un problema difícil debido a que esas máquinas deben operar con recursos computacionales y sensoriales limitados, en ambientes al aire libre que pueden ser dinámicos y no estructurados, al aire libre, a menudo con poca visibilidad y en condiciones ambientales inclementes.

En la última década, un amplio número de esfuerzos de investigación se han dirigido a los modelos, sensores, actuadores, estrategias de control y a las arquitecturas de sistemas, para la operación del movimiento de tierra automática. Para el control de excavadores automáticos, la mayoría de la investigación se ha concentrado en el tipo de excavador "backhoe" y los métodos activos de control para la hoja cortadora han sido la base para muchos estudios.

El mayor problema para trabajos como éste, es el requerimiento de un modelo matemático para la interacción entre las máquinas y el ambiente. Sin embargo, en la excavación, especialmente en la excavación de rocas, es imposible predecir qué ocurrirá exactamente a las máquinas porque las características de los materiales en el sitio de la excavación no pueden ser predeterminadas, y las condiciones de excavación cambian continuamente, en la medida en que las máquinas mueven el material.

Esta complejidad implica que las máquinas automatizadas para la excavación pueden no ser capaces de utilizar métodos de control convencionales que están basados en ecuaciones matemáticas, debido a que resulta impráctico o irrealizable desarrollar modelos analíticos para especificar la interacción entre la máquina excavadora y su ambiente. Por lo tanto, se deben desarrollar nuevos métodos de control para tales aplicaciones.

Por otro lado, los operadores humanos pueden lograr un control sofisticado de máquinas excavadoras en ambientes dinámicos, inestructurados e impredecibles. Esto nos ha llevado a trabajar usando programación de comportamiento, control difuso, y redes neuronales para la excavación automática, desde los comienzos de la década de los 90.

La motivación para este tipo de enfoque es simple: Como el proceso humano de control para las tareas de excavación no requiere de modelos analíticos de la interacción máquina/ambiente, es ventajoso construir un sistema de control para la excavación usando la experiencia y el conocimiento de los operadores humanos expertos. Tanto las pruebas de laboratorio con prototipos de máquinas excavadoras como la implementación en campo de

ruedas cargadoras industriales y otro tipo de vehículos han producido resultados exitosos y han demostrado grandes potenciales para nuestros métodos de control propuestos.

Este artículo se centra en control basado en agentes para programación difusa de comportamiento en excavación robótica. La idea básica es modificar y encapsular los programas de comportamiento que hemos desarrollado para la excavación en agentes de control para que se puedan manejar y ejecutar en un ambiente interconectado. Esto nos permitirá implementar un sistema de control para excavación robótica de alto rendimiento e inteligencia con recursos computacionales y memoria limitados.

# 1) Control Basado en Agentes para Excavación

En el enfoque convencional de control de comportamiento, la excavación robótica es generalmente llevada a cabo a través de los siguientes pasos: Especificación de objetivos, organización de tareas, coordinación de comportamiento y ejecución de acciones. Este enfoque está basado en la restricción de que el sistema de control para excavación robótica debe estar alojado y soportado enteramente por el equipo de computación que se encuentre en el vehículo, normalmente en minas.

Sin embargo, en nuestro nuevo enfoque de control basado en agentes, asumimos que los vehículos de excavación están conectados a un centro de operación, a través de redes inalámbricas, normalmente comunicación vía satélite, como los usados actualmente por algunos cargadores de neumáticos Caterpillar, pero solo para propósitos de servicio y mantenimiento hasta ahora. La disponibilidad de la conectividad inalámbrica nos permite diseñar una nueva arquitectura de control que podría utilizar recursos computacionales adicionales para ejecutar tareas de excavación de forma más efectiva e inteligente sin incrementar los costos actuales de los sistemas de implementación.

En el control basado en agentes para la programación de comportamiento en la excavación robótica, el sistema de control está dividido en dos partes: Un sistema de control local para la ejecución de tareas y un supervisor remoto para el despacho y aprendizaje.

El sistema de control local para excavación está soportado por un vehículo de minería y dirige sus tareas con un grupo de agentes de control por defecto que se encuentran en el vehículo y un grupo de agentes de control activos que están provistos por un supervisor remoto, a través de la red. Cuando la comunicación está disponible y se permiten respuestas en tiempo real, agentes de control activos ejecutarán la tarea de excavación y normalmente conducirán a mejores resultados en términos de la productividad y de daños a los vehículos.

Si la red está caída o no se permiten respuestas en tiempo real, entonces las tareas de excavación serán llevadas a cabo por, o bien los agentes de control activos que se ejecutan en ese momento, o por los agentes de control por defecto, ya que ellos son los únicos agentes de control disponibles para la tarea de ejecución en esas situaciones.

El supervisor remoto está alojado en un centro remoto de operación central, conectado al vehículo a través de la red inalámbrica. La función principal de el supervisor es mantener, modificar, incluso diseñar agentes de control para excavación, seleccionar y enviar un agente de control particular o un grupo de agentes de control como agentes de control activos para la ejecución óptima al control local, basándose en las características del sitio, capacidades del vehículo.

Las dos cuestiones clave para la supervisión remota son los algoritmos de aprendizaje efectivo para mejorar la ejecución de los agentes de control y los algoritmos de despacho para determinar cuándo y cuáles agentes de control serán seleccionados y programados para ser enviados para tareas de excavación local.

En el enfoque de control basado en agentes, la excavación robótica es conducida mediante especificación de objetivos, organización de tareas, coordinación de agentes, y ejecución de movimientos. Generalmente, un objetivo de excavación puede ser asignado tanto por un operador humano o seleccionado por un sistema de control a partir de un grupo de objetivos predeterminados. Un objetivo se logra organizando apropiadamente las tareas de excavación en secuencias de ejecuciones. Una tarea de excavación está conducida coordinando agentes de control activos o por defecto, basados en retroalimentación sensorial y las condiciones del vehículo. Finalmente, un agente de control ejecuta sus funciones a través de una secuencia de comandos de primitivas de movimiento que son prediseñados y especificados por reglas de decisión difusas.

## 2) Coordinación y Especificación de Agente

Una Red de Petri es una herramienta formal, matemática y gráfica para el modelado de sistemas. En 1962 Carl Adam Petri definió esta herramienta que generaliza los autómatas de estado finito. La herramienta permite especificar una variedad de sistemas concurrentes, distribuidos, asíncronos paralelos, determinísticos y no determinísticos.

Las Redes de Petri son aplicadas a diferentes disciplinas: ingeniería, manufactura, negocios, química y ahora hasta en procesos judiciales. Como herramienta gráfica, las redes de Petri al igual que los diagramas de flujo pueden ser usadas como ayuda para comunicación visual.

En cuanto al diseño de máquinas inteligentes, las redes de Petri son utilizadas para formalizar el proceso de coordinación y especificación de agentes. Esto se logra modelando a las tareas y a los agentes utilizando transductores (PNTs). Un PNT (Transductor de Redes de Petri) para tareas de excavación especifica todas las secuencias realizables de agentes para su finalización, mientras que un PNT para un agente de control define todas las posibles secuencias de primitivas de movimiento para su ejecución.

Un PNT M, M es una séxtupla:

$$M= (N, \Sigma, \Delta, \sigma, \mu, F)$$

Donde:

i) $N= (P,T,I,O)$ es una red Petrti con la marca inicial $\mu$;
ii) $\Sigma$ es un alfabeto de entrada finito;
iii) $\Delta$ es un alfabeto de salida finito;
iv) $\sigma$ es un mapa de traducción de $T \times (\Sigma \cup \{\lambda\})$ al grupo finito de $\Delta^*$;
v) $F \subseteq R(\mu)$ es un grupo de marcas finales;

$\lambda$ representa el string vacío, $\Delta^*$ el grupo de todos los strings sobre $\Delta$, y $R(\mu)$ el grupo de marcas alcanzables de $\mu$.

En el modelo actual Σ representa el grupo de fuentes de entrada al PNT, Δ el grupo de comandos o salidas del PNT, la red Petri N y el mapeo σ determinan el estado de transición y la tarea de ejecución, μ y F especifican el estado inicial y el grupo de estados finales a ser alcanzados por el PNT, respectivamente.

Usando un PNT, el proceso de coordinación de agentes para una tarea de excavación TC puede ser especificado de la siguiente manera:

$$TC= (Nt, \Sigma a, \Delta a, \sigma t, \mu t, Ft)$$

Donde:

i) Nt= (Pt,Tt,It,Ot) es una red Petrti con la marca inicial μ; subyacente a todas las secuencias realizables de los agentes de control para la tarea de finalización;
ii) Σa es el grupo agentes de control aplicables a la TC;
iii) Δa es el grupo agentes activos o por defecto aplicables a la TC;
iv) σt: Tt x (Σa U {λ}) => Δa* es un mapeo que σt (t, CA) = CA donde CA es un agente activo o por defecto, en otras palabras, σt (t, CA) especifica un agente alternativo o agente secuencial para ejecutar CA;
v) Ft $\subseteq$ R(μt) es y un grupo de marcas finales que indican la tarea de finalización.

La Figura 1 ilustra este proceso de modelado para la tarea de excavación: "Desenterrar-una-partícula más grande de lo normal". La red Petri de la Fig. 1 especifica el proceso de coordinación de agentes de control para esta tarea específica, donde:

Σa= Δa= {CA2: excavación horizontal
CA4: under-partícula-follower
CA9: excavación hacia arriba
CA6: extraer pala
CA5: levantar pala}

Ft={(0,0,0,0,1)}

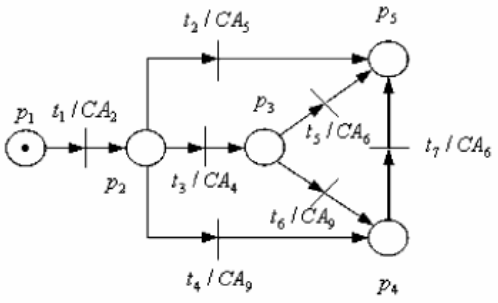


Fig. 1. PNT for task of "*unearth-an-oversized-particle.*"

En la Tabla I se muestra una descripción detallada de agentes de control para excavación.

TABLE I
TYPICAL CONTROL AGENTS FOR EXCAVATION TASKS

| | |
|---|---|
| *Name* | *$CA_1$ : Entry-point-mover* |
| Move the bucket to the initial loading location as instructed by the higher control level or other modules in the control system; | |
| *Name* | *$CA_2$: Horizontal-digger* |
| Make the bucket dig forward horizontally along a preset elevation, and small deviations above or below the preset elevation is allowed; | |
| *Name* | *$CA_3$: Over-particle-follower* |
| Move the bucket to load over the top of encountered over-sized particles by digging in parallel to the surface of the particles; | |
| *Name* | *$CA_4$:Under-particle-follower* |
| Make the bucket to dig down or underneath encountered over-sized particles within a preset limit on the rotating down angle; | |
| *Name* | *$CA_5$: Bucket-lifter* |
| Lift the bucket from the current position until it clears the pile, and make it hoist forward and up whenever possible to load more materials; | |
| *Name* | *$CA_6$:Bucket-extractor* |
| Recover from failures of executing other control agents by extracting the bucket back to a preset position without considering the lose of loaded materials; | |
| *Name* | *$CA_7$:Floor-follower* |
| Make the bucket to clear the excavation site by loading forward while maintaining the contact with the floor of the excavation site; | |
| *Name* | *$CA_8$:Down-digger* |
| Make the bucket to excavate in a downward direction while keeping its orientation at a preset attack angle, and small deviations from the preset attack angle are allowed; | |
| *Name* | *$CA_9$:Up-digger* |
| Make the bucket to extract over-sized particles within the material pile or from the excavation ground and an special effort is made to prevent the particles from rolling out of the bucket; | |
| *Name* | *$CA_{10}$:Pusher* |
| Make the bucket to push over-sized particles away from the loading path to a location determined by other modules of the control system. | |

Similarmente, el proceso de ejecución de primitivas de movimiento para un agente de control de excavación debe ser especificado por medio de un PNT como:

$$CA= ((Na, \Sigma p, \Delta p, \sigma a, \mu a, Fa)$$

Donde:

i) Na= (Pa,Ta,Ia,Oa) es una red Petrti con la marca inicial μ; subyacente a todos los primitivas de movimiento realizables de agentes de control para la tarea de finalización;

ii) Σp = Δp es el grupo primitivas de movimiento aplicables al agente de control CA;

iii) es el grupo agentes activos o por defecto aplicables a la TC;

iv) σa: Ta x (Σp U {λ}) => Δp* es un mapeo simple σa (t, p) = p es asumido aquí;

v) Fa $\subseteq$ R(μa) es un grupo de marcas finales que indican la tarea de finalización del agente de ejecución.

La Figura 2 es un ejemplo de la red PNT para un agente de control de excavación: "under-partice-follower". La red Petri de la Figura 2. Especifica el proceso de ejecución de las primitivas de movimiento para el agente de control, donde:

Σp = Δp = {pm1, pm3, pm4, pm11, pm14}
Fa={(1,0,0)}

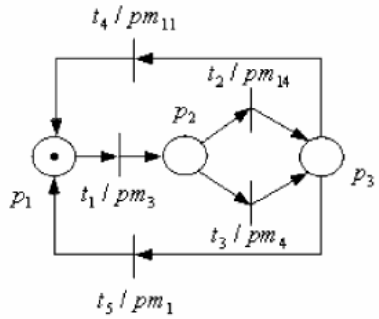


Fig. 2. PNT for control agent *under-particle-follower*.

Como se puede ver, el PNT en la Figura. 2 define cuatro secuencias posibles en un ciclo de ejecución para agentes de control "under-particle-follower".

i) pm3 → pm4 →pm1;
ii) pm3 → pm4 →pm11;
iii) pm3 → pm14 →pm1;
iv) pm3 → pm14 →pm11;

Se debe utilizar información on-line y en tiempo real sobre la retroalimentación sensorial de esfuerzo/torque para determinar cual secuencia será usada para llevar a cabo la función de agente de control en la excavación actual.

# 3) Agentes de Control y Primitivas de Movimiento

Desde 1992, se han desarrollado una gran colección de programas de comportamiento para excavación robótica experimental en la Universidad de Arizona. Esos comportamientos de excavación han sido construidos y formulados en base a las observaciones en vivo o de videos de operadores humanos expertos de cargadores de neumáticos en diversas minas abiertas. Recientemente, se han modificado y encapsulado esos comportamientos en agentes de control que puedan ejecutarse en un ambiente interconectado.

De las funciones descritas en la Tabla I, está claro que esos agentes de control tienen las siguientes características: 1) La especificación funcional de un agente de control individual es muy amplia para que pueda ser lograda ejecutando un único movimiento robótico simple; y 2) Muchos términos usados en esas descripciones son muy ambiguos o al menos no especifican con suficiente precisión. Para implementar esos agentes de control para

excavación, se introducen primitivas de movimiento diseñadas para ejecutar tareas simples de excavación.

La Tabla II es una lista de primitivas de movimiento aplicables para agentes de control a utilizar para su ejecución de tarea. Esas primitivas de movimiento son desarrolladas en base al análisis de las acciones básicas de excavación de la pala frontal de cargadores. Note que el movimiento de la pala es plano debido a que tanto su traslación como su rotación están confinados al plano vertical paralelo al eje principal del vehículo cargador.

TABLE II
PRIMITIVE MOTIONS FOR EXCAVATION CONTROL AGENTS.

| *Symbol* | *Name* |
|---|---|
| $pm_1$ | *move forward parallel to bucket bottom* |
| $pm_2$ | *move upward perpendicular to bucket bottom* |
| $pm_3$ | *move backward parallel to bucket bottom* |
| $pm_4$ | *move downward perpendicular to bucket bottom* |
| $pm_5$ | *move forward up* |
| $pm_6$ | *move backward up* |
| $pm_7$ | *move forward down* |
| $pm_8$ | *move backward down* |
| $pm_9$ | *dig forward and rotate up* |
| $pm_{10}$ | *dig backward and rotate down* |
| $pm_{11}$ | *dig forward down and rotate down* |
| $pm_{12}$ | *dig backward down and rotate up* |
| $pm_{13}$ | *rotate up* |
| $pm_{14}$ | *rotate down* |

Esas primitivas de movimiento son comandos de control que pueden traducir la información disponible de la retroalimentación sensorial, principalmente señales de esfuerzo/torque, a movimientos de la pala. Debido a la gran dificultad para interpretar esas señales de esfuerzo/torque con precisión resulta bastante natural proponer lógica difusa para su representación e implementación, como se describe en la siguiente sección.

# 4) Reglas de Control Lógico Difuso para Primitivas de Movimiento de Excavación Robótica.

En nuestro experimento de excavación robótica, solo los datos sensoriales de esfuerzo/torque son utilizados para inferir la interacción pala/ambiente. Sin embargo, debido a que no es posible determinar con precisión la situación de la interacción y la gran dificultad para especificar con precisión los patrones útiles para las condiciones de excavación a partir de la información sensorial esfuerzo/torque, se utilizan reglas de control basado en lógica difusa para expresar las primitivas de movimiento de excavación.

La Figura 3. Muestra el sistema de coordenadas para el brazo robótico, pala y el sensor de esfuerzo/torque de muñeca. Tomando F y ΔF como vector de variación de esfuerzo/torque durante dos puntos de muestreo consecutivo, y M como el vector de control movimiento de la pala, esto es:

$$F = (Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)^T$$
$$\Delta F = (\Delta Fx, \Delta Fy, \Delta Fz, \Delta Mx, \Delta My, \Delta Mz)^T$$
$$M = (\Delta y, \Delta z, \Delta r, BV)^T$$

Donde Δy y Δz son cambios traslacionales en la posición de la pala a lo largo de los ejes y y z, Δr es el cambio rotacional de la orientación de la pala a lo largo del eje x y BV es la velocidad de la pala. La variación ΔF en las lecturas de esfuerzo/torque son usadas para detectar colisiones entre la pala y las partículas de roca ya que generalmente es muy difícil o casi imposible diferencia la resistencia normal del movimiento dla pala usando únicamente información instantánea de la esfuerzo/torque.

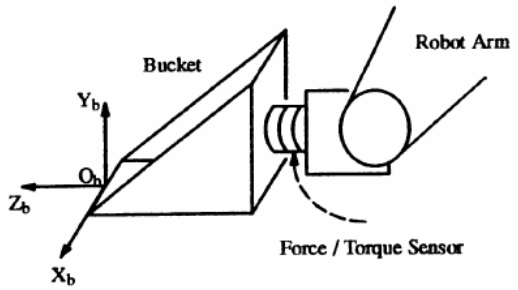


Fig. 3. Coordinate system for robotic excavation.

Por ejemplo, el movimiento dig-foward-and-rotate-up (excava hacia adelante y rota hacia arriba) (pm9) se especifica mediante el siguiente grupo de reglas de decisión difusas:

**Rule 1** –IF $M_x$ is PL, THEN $\Delta_y$ is ZR, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PS, and $BV$ is PM

**Rule 2** –IF $M_x$ is PS, THEN $\Delta_y$ is PM, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PL, and $BV$ is PL

**Rule 3** –IF $M_x$ is ZR, THEN $\Delta_y$ is PM, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PL, and $BV$ is PL

**Rule 4** –IF $M_x$ is NS, THEN $\Delta_y$ is PM, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PL, and $BV$ is PL;

**Rule 5** –IF $M_x$ is NL, THEN $\Delta_y$ is PL, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PL, and $BV$ is PL;

**Rule 6** –IF $F_z$ is NL, THEN $\Delta_y$ is PL, $\Delta_z$ is PS
$\Delta_r$ is PS, and $BV$ is PS;

**Rule 7** –IF $F_z$ is NS, THEN $\Delta_y$ is PL, $\Delta_z$ is PM
$\Delta_r$ is PS, and $BV$ is PM;

**Rule 8** –IF $F_z$ is ZR, THEN $\Delta_y$ is PL, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PS, and $BV$ is PL;

**Rule 9** –IF $F_z$ is PS, THEN $\Delta_y$ is PL, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PS, and $BV$ is PL;

**Rule 10** –IF $F_z$ is PL, THEN $\Delta_y$ is PL, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PS, and $BV$ is PL;

**Rule 11** –IF $\Delta F_y$ is PL, THEN $\Delta_y$ is PL, $\Delta_z$ is PL
$\Delta_r$ is PL, and $BV$ is PL;

Donde (PL, PM PS, ZR, NS, NM, NL) es un grupo de términos lingüísticos difusos para grande positivo, medio positivo, pequeño positivo, cero, pequeño negativo, medio negativo y grande negativo.

La Figura 4. Ilustra las funciones de pertenencia para esos términos. Note que cuando se computa, el universo del discurso de señales de entrada y salida se normalizan linealmente en intervalos [-1000. 1000] y [-100, 100] respectivamente. Un factor de escala grande se utiliza para señales de entrada para alcanzar una alta resolución, mientras que un factor de escala pequeño se aplica para evaluar los controles de salida debido a que normalmente sus valores son bastante pequeños en nuestros experimentos de laboratorio.

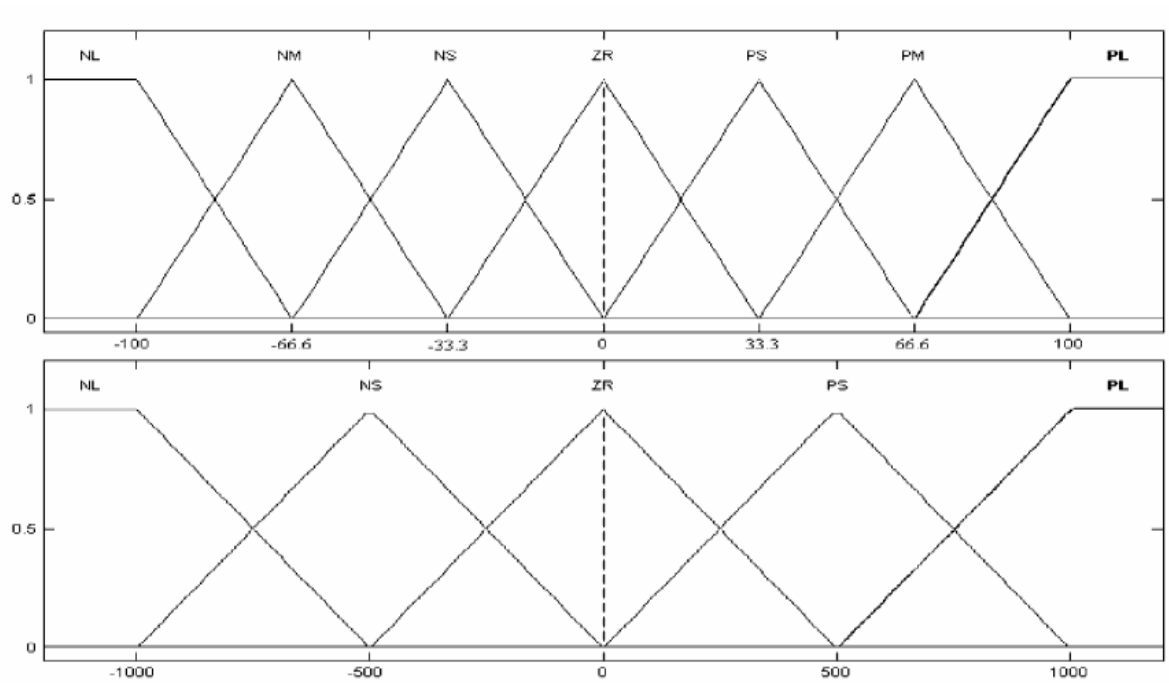


Fig. 4. Membership functions for fuzzy linguistic terms.

Utilizando el procedimiento estándar para el razonamiento difuso y la "desfuzzificación", se puede obtener un valor para conducirlas primitivas de movimiento. La primitiva dig-foward-and-rotate-up puede obtenerse con el conjunto de reglas expuestas anteriormente una vez que estén disponibles la lectura actual de esfuerzo/torque y su variación.

En general, la primitiva de movimiento *pmi* puede ser implementada como un grupo de reglas de decisión difusas de la siguiente manera:

$$\textbf{Rule 1} - \text{IF } F \text{ is } Q_{i1} \text{ and } \Delta F \text{ is } \Delta Q_{i1}, \text{ THEN } M \text{ is } U_{i1};$$
$$\vdots$$
$$\textbf{Rule n}_{\boldsymbol{i}} - \text{IF } F \text{ is } Q_{in_i} \text{ and } \Delta F \text{ is } \Delta Q_{i1}, \text{ THEN } M \text{ is } U_{in_i}$$

Donde ni es el número de reglas para pmi, y Qi1, ΔQi1 y Ui1 son términos lingüísticos para la posición y orientación de la pala, las señales esfuerzo/torque y su variación, y comandos de control de movimiento respectivamente.

Como ya señalamos en la sección III, en un agente de control, se puede habilitar más de una primitiva de y ponerlas a competir para la tarea de ejecución. Por lo tanto, se debe llevar a cabo un proceso de arbitraje para determinar cuál primitiva de movimiento será seleccionada para la acción (o para el disparo en términos del lenguaje de las redes Petri). Una regla de arbitraje razonable es seleccionar primitivas de movimiento basadas en los niveles en los cuales las precondiciones de sus reglas difusas son satisfechas.

En este artículo el valor promedio de las entradas de las funciones de pertenencia de una primitiva de movimiento es usado como arbitraje, esto es, la primitiva de movimiento con el más alto valor promedio de entrada de las funciones de pertenencia, el cual está habilitado bajo la marca actual de un agente de control para excavación, serán seleccionados para las tareas de ejecución. Cuando el más alto valor promedio de entrada de las funciones de pertenencia, de un agente de control está por debajo de un valor umbral, un nuevo agente de control debe ser llamado en el ámbito local, o sobre la red, para reemplazar el agente de control actual que está ejecutándose, para continuar la tarea.

Además se introduce una regla similar de arbitraje para resolver la competición para la ejecución de agentes de control en un PNT para una tarea de excavación. Se define el más alto valor promedio de las funciones de pertenencia de entrada de todas las primitivas de movimiento habilitadas de un agente de control como su fuerza de disparo. El agente de control con la mayor fuerza de disparo, que esté habilitado bajo la marca actual para la tarea de excavación, será seleccionado para la ejecución. Varios resultados experimentales llevados a cabo en laboratorio han demostrado la efectividad de esas reglas simples de arbitraje, como se podrá ver en la siguiente sección.

# 5) Experimentos de Laboratorio

Para probar y demostrar la efectividad del método propuesto de control basado en agentes para excavación robótica, se desarrolló un prototipo experimental en el Laboratorio de Robótica y Automática de la Universidad de Arizona. El sistema está compuesto por: Un yacimiento de excavación, un sensor de esfuerzo/torque, un brazo robótico PUMA con un pala de excavación, una tarjeta interfaz para recibir y alojar agentes de control, y un control remoto supervisor que realiza el mantenimiento de todos los agentes de control de excavación y comunica las tareas de excavación y los agentes con tarjeta de interfaz y el brazo PUMA, vía Internet.

## A. Tareas de Excavación Simple

El primer grupo de experimentos robóticos fue diseñado para probar y evaluar la ejecución de los agentes de control individuales para tareas simples de excavación. La Figura 6 muestra los resultados de un agente de control para excavación “over-particle-follower”. La función de este agente de control es hacer que la orientación dla pala siga el contorno de la partícula, rotando el pala, inclinándolo hacia arriba cuando pasa sobre la parte frontal de la roca y rotando e inclinando hacia abajo mientras se mueve hacia abajo a lo largo de la roca.

De esta manera, la pala tratará de excavar paralelamente en la superficie de la roca. Esto permite reducir la resistencia encontrada durante la excavación mientras permite subir y/o descender rápidamente por en frente o por detrás de la roca. Este agente se utiliza para

diversas tareas de excavación robótica debido a que puede ser usado para descubrir objetos enterrados (invisibles) sin dañar tanto la pala ni el objeto enterrado.

La Figura 7 ilustra que la ejecución de un agente de control "under-particle-follower" usado para excavar grandes rocas. Esta ejecución experimental muestra que la pala tiene que hacer contacto dos veces antes de que este pueda avanzar por debajo de la roca, un comportamiento que imita las acciones de los humanos, usando una pala para excavar por debajo de la roca.

Para ello, el agente de control primero repite la secuencia de movimientos primitivos: move-backward (pm3), move-down (pm4) y move-foward down-and-rotate-up (pm11) hasta que la inclinación de la pala alcanza el punto vertical debajo del punto inicial de contacto, y entonces comienza la secuencia de rotate-up (pm14) y move-forward (pm1) hasta que la pala está en posición horizontal. Note que en la última secuencia, se llama a la primitiva de movimiento move-backward (pm3), pero ésta no es ejecutada.

Los resultados de estos dos experimentos, así como también en otros, han demostrado adaptabilidad de los agentes de control para excavación robótica en condiciones desconocidas y su efectividad en tareas simples, en ambientes no estructurados.

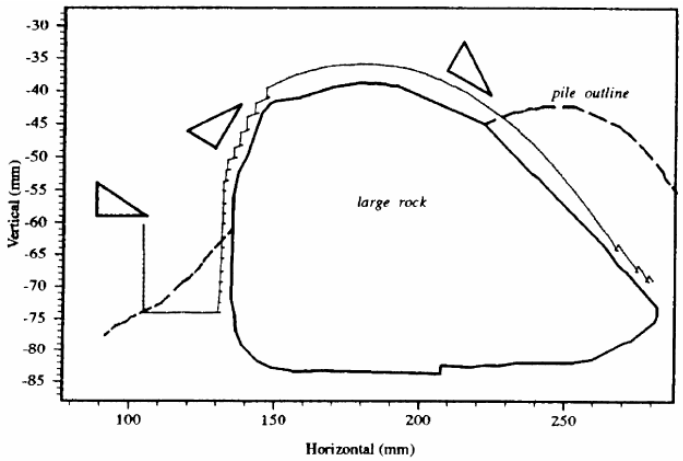


Fig. 6. Bucket trajectory of running *over-particle-follower*.

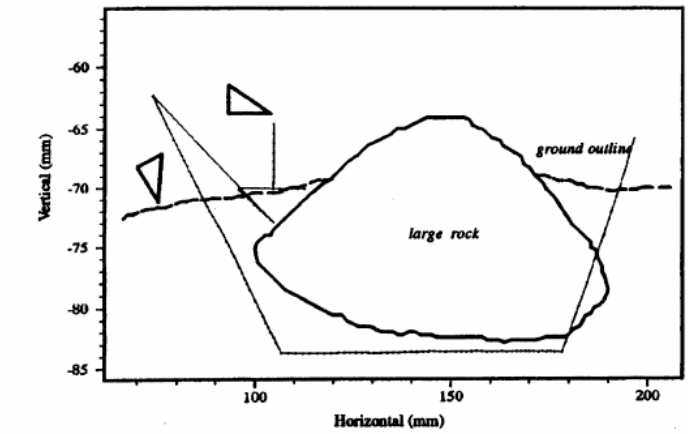


Fig. 7. Bucket trajectory of running *under-particle-follower*.

## B. Tareas Complejas de Excavación

El segundo grupo de experimentos fue diseñado para validar y evaluar la capacidad, ejecución y coordinación de agentes de control para completar tareas de excavación robótica complejas. Las siguientes Figuras presentan los resultados alcanzados para la tarea de excavación de "*loading along a horizontal plane and removing buried rocks when encountered, or loading over the rocks to expose its surface if they cannot be removed"* (cargar a lo largo de un plano horizontal y removiendo rocas enterradas cuando estas sean encontradas, o cargar por encima de las rocas para destapar su superficie si estas no pueden ser removidas". Para realizar estos experimentos, se enterraron dos rocas en el lugar de la excavación.

La Figura 8 muestra la trayectoria de inclinación de la pala en el primer experimento. Al principio, el agente de control "entry-point-mover" coge la pala para seleccionar el punto de entrada y cuando la pala entra en contacto con la roca, se activa el agente "horizontal-digger" hasta que se encuentra una gran roca en el punto A.

En ese momento la retroalimentación sensorial de esfuerzo/torque deduce que se encuentra ante una superficie inclinada hacia arriba y que se encuentra lejos de la pala, lo cual indica que puede ser más fácil cargar a través de la parte superior de la roca, por lo tanto se llama al agente "over-particle-follower" para que actúe.

La pala pasa exitosamente sobre la parte superior y baja por la parte de atrás de la roca hasta que alcanza la elevación inicial de excavación. Puesto que la pala no percibe que se encuentra llena, se selecciona nuevamente al agente "horizontal-digger" para que continúe la tarea de excavación. En el punto B, se llama una vez más al agente "over-particle-follower" ya que se detecta otra roca y la pala ya ha cargado otros materiales. Finalmente, en el punto C, la pala detecta que se encuentra llena y por lo tanto se emplea el agente de control "pala-lifter" para completar la tarea de carga.

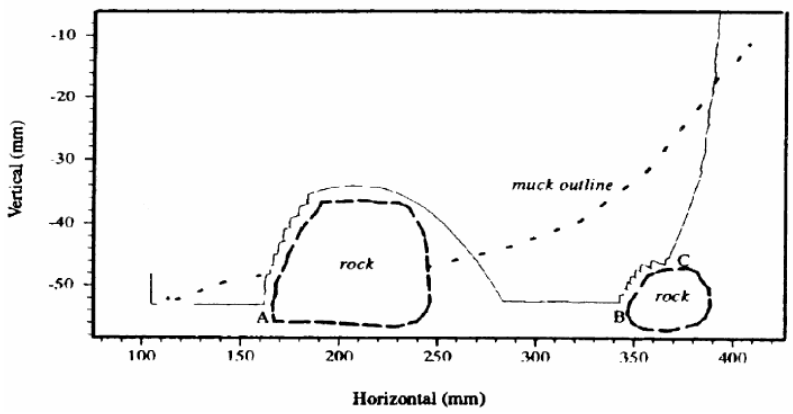


Fig. 8. Bucket trajectory during task execution: One.

En la Figura 9 se muestra otro experimento. En este caso, la pala hace contacto con la superficie de una gran partícula y excava por debajo para removerla con el agente de control "under-particle-follower". Se selecciona este agente debido a que la pala está casi siempre vacía y la fuerza Fy y Fz indican que la roca no está orientada hacia arriba abruptamente lo cual significa que la roca no está enterrada profundamente.

Mientras se está ejecutando este agente en el punto A, resulta que las reglas de arbitraje deciden abortar el procedimiento debido a que la pala no puede rotar hacia abajo por lo cual se selecciona el agente "bucket-extrator" para recuperar la pala y seguidamente se ejecuta el agente "over-particle-follower" hasta alcanzar el punto B donde la pala regresa a su elevación de excavación original y entonces se activa el agente "horizontal-digger". Finalmente, en el punto C la pala se encuentra llena y es removida por el agente "bucket-lifter".

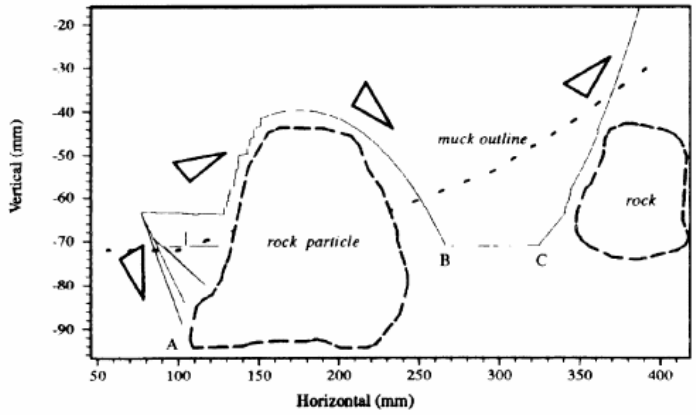


Fig. 9. Bucket trajectory during task execution: Two.

Estos resultados experimentales indican que el control basado en agentes para excavación robótica puede emular las habilidades básicas y el comportamiento de los operarios humanos en excavaciones para llevar a cabo tareas complejas de excavación en ambientes desconocidos.

## 6) Comparación con otros Artículos Científicos sobre Excavación Robótica

Como comentamos antes, en este artículo, las redes de Petri son utilizadas para formalizar el proceso de coordinación y especificación de agentes.

Otro modelo comúnmente usado para coordinación de agentes y especificación es la máquina de estados finita (FMS).

Una aplicación práctica sobre este método de coordinación de agentes es descrito en el artículo **"Experimental Robotic Excavation with Fuzzy Logic and Neural Networks"** de Xiaobo Shi, Paul J.A. Lever, Fei-Yue Wang (Abril, 1996).

En este artículo los objetivos, las tareas y los comportamientos se especifican mediante el uso de la FMS, basándose en excavación heurística y la experticia de los operarios humanos.

No obstante, aunque los resultados a diversos experimentos demuestran la habilidad del sistema para completar las tareas de excavación con efectividad, tenemos que decir que las redes de Petri son más apropiadas para ejecutar estas tareas.

La principal ventaja de las redes Petri sobre la máquina de estados finita es la capacidad que tienen las redes Petri para representar cooperación, paralelismo, y conflictos en ambientes y recursos compartidos.

Una red de Petri es una herramienta para el modelado de sistemas de información que son considerados no determinísticos, concurrentes, paralelos, asíncronos, distribuidos y/o estocásticos.

## Conclusiones

Este artículo presenta un control basado en agentes para programación de comportamiento difuso en excavación robótica y los correspondientes resultados experimentales en una ambiente de excavación simulada usando un manipulador robótico PUMA.

En este enfoque, el problema de control para excavación robótica es resuelto mediante la descomposición de tareas complejas en varias acciones simples que pueden ser implementadas mediante agentes de control a través de primitivas de movimientos.

Los transductores de redes Petri y las reglas de decisión basadas en lógica difusa son usados para especificar los agentes de control y las primitivas de movimiento para llevar a cabo las tareas de excavación. Los experimentos de laboratorio validan este enfoque y demuestran su efectividad.

El desarrollo de la técnica de control es un paso inicial para lograr excavaciones robóticas autónomas en aplicaciones del mundo real. Se están realizando importantes esfuerzos para aplicar esta técnica a los cargadores de neumáticos industriales para operaciones en minas y éstos serán reportados en nuestros trabajos futuros.

# Bibliografía

[1] "Agent-Based Control for Fuzzy Behaivor Programming in Robotic Excavation" Fei-Yue Wang, Fellow. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol 12, Nº 4, (August, 2004), Pages: 540-548

[2] "Experimental Robotic Excavation with Fuzzy Logia and Neural Networks" Xiaobo Shi, Paul J.A. Lever, Fei-Yue Wang. IEEE, International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota, (April 1996) Pages: 957-962

[3] "Agent-Based Control Systems" Nicholas R. Jennings and Stefan Bussman. IEEE Control Systems Magazine, (June 2002). Pages: 61-73