

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA



MODELOS AUTOMATIZADOS DE APLICACION Y MODELAMIENTO

**TITULACION POR EXAMEN PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRONICO**

ENRIQUE HIGA MORENO

PROMOCION 1990 - I

LIMA - PERU

1997

DEDICATORIA

A mis padres y esposa por su cariño y confianza y todo el apoyo brindado a mi persona.

MODELOS AUTOMATIZADOS DE APLICACION Y MODELAMIENTO

SUMARIO

En el presente trabajo se exponen modelos automatizados para aplicación y modelamiento, en algunos casos probados en forma práctica y otros como modelos que sirven para desarrollar otras aplicaciones en automatización y robótica.

Sobre las muchas líneas de investigación en el campo de la automatización y robótica, que actualmente se desarrollan en Japón y otros países, en donde estas máquinas están tomando cada vez una presencia importante, especialmente en las líneas de producción, investigación y manipulación de compuestos delicados, se presentan solo algunos casos de sus numerosas aplicaciones. En este trabajo se exponen de manera descriptiva, no desarrollada minuciosamente, algunas aplicaciones dentro de las muchas que hay en estos campos.

INDICE

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO I | |
| FUNDAMENTO TEORICO | 2 |
| 1.1 Introducción..... | 2 |
| 1.2 Desarrollos..... | 3 |
| 1.3 Clasificación | 5 |
| 1.3.1 Tecnologia | 5 |
| 1.3.2 Geometria del entorno de trabajo | 5 |
| 1.3.3 Métodos de control de movimiento | 7 |
| 1.4 Especificaciones en robótica..... | 8 |
| 1.5 Cinemática y dinámica de un brazo robot..... | 8 |
| 1.6 Sensado en robots | 9 |
| CAPITULO II | |
| MODELOS AUTOMATIZADOS PARA MODELAMIENTO | 11 |
| 2.1 Simulación de sistemas físicos a partir de modelos geométricos | 11 |
| 2.1.1 Definición del sistema..... | 12 |
| 2.1.1.1. Modelo abstracto..... | 14 |
| 2.1.1.2. Modelos geométricos..... | 14 |
| 2.1.1.3 Modelo de interferencia | 15 |
| 2.1.1.4 Modelo dinámico | 16 |
| 2.1.2 Análisis del sistema | 18 |

| | | |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.2.1 | Paquete de simulación..... | 19 |
| 2.1.2.2 | Manejador de eventos..... | 22 |
| 2.1.2.3 | Impacto..... | 23 |
| 2.1.2.4 | Fuerzas restauradoras..... | 24 |
| 2.1.2.5. | Fricción..... | 24 |
| 2.1.2.6 | Consideraciones de interfase..... | 25 |
| 2.1.3. | Reporte del sistema..... | 25 |
| 2.2 | Definición de trayectorias para un manipulador..... | 26 |
| 2.2.1. | Modelo matemático..... | 28 |
| 2.2.2. | La trayectoria de tiempo mínimo..... | 30 |
| 2.2.3. | Optimización general..... | 34 |
| 2.3 | Control de movimiento coordinado de brazos robots..... | 36 |
| 2.3.1 | Resolución de movimiento y fuerza/momento..... | 36 |
| 2.3.2. | Dinámica del brazo robot..... | 41 |
| 2.3.3. | Arquitectura de control..... | 42 |
| 2.3.3.1 | Concepto del modelo interno virtual..... | 43 |
| 2.3.3.2. | Diseño de la arquitectura de control..... | 44 |
| 2.3.3.3 | Algoritmo de control..... | 46 |
| CAPITULO III | | |
| MODELOS AUTOMATIZADOS DE APLICACION..... | | 48 |
| 3.1 | Sistema de navegación visual para vehículos terrestres..... | 48 |
| 3.1.1 | Multiescala de navegación..... | 49 |
| 3.1.2 | Arquitectura del sistema..... | 50 |
| 3.1.2.1 | Bootstrap vs alimentación delantera..... | 50 |
| 3.1.2.2 | Responsabilidad de los módulos..... | 51 |
| 3.1.2.3 | Seguidor de camino..... | 52 |
| 3.1.3. | Capacidad computacional de los módulos..... | 57 |
| 3.1.3.1 | Base de reconocimiento visual..... | 57 |

| | | |
|-----------------|--------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3.2 | Geometría | 58 |
| 3.1.3.3 | Representación tridimensional | 63 |
| 3.1.3.4 | Predictor | 66 |
| 3.1.3.5 | Sensor de control | 67 |
| 3.1.3.6 | Navegador | 67 |
| 3.1.3.7 | Piloto | 68 |
| 3.1.3.8 | Planeador | 68 |
| 3.2 | Robot de vigilancia terrestre (RVT) | 68 |
| 3.2.1. | Problema | 69 |
| 3.2.2. | Tareas | 69 |
| 3.2.3. | Vehículo | 70 |
| 3.2.4. | Diseño del RVT | 71 |
| 3.2.4.1. | Arquitectura del sistema | 71 |
| 3.2.4.2. | Movilidad y control del vehículo | 75 |
| 3.2.4.3 | Posición y orientación del vehículo | 77 |
| 3.2.4.4. | Eludir obstáculos | 78 |
| 3.2.4.5. | Modelo de terrenos | 80 |
| | CONCLUSIONES | 83 |
| | BIBLIOGRAFIA | 84 |

INTRODUCCION

En este trabajo se quiere resaltar la gran gama de posibilidades que existen en el campo de la automatización y robótica que tienen aplicaciones prácticas muy variadas.

En este caso se abordarán tres modelos en el capítulo II y dos modelos en el capítulo III, los que se desarrollarán de manera descriptiva, sin llegar a profundizar demasiado los temas, lo cual también deja abiertos los caminos para ampliar o aplicar en forma práctica estos modelos. Por lo tanto, los alcances del presente trabajo no cubren la fase de experimentación, pero los modelos expuestos satisfacen las condiciones teóricas necesarias para su fundamentación.

Finalmente quiero expresar mi gratitud a esta casa de estudios que me brindó todo lo que ahora puedo utilizar para desempeñarse profesionalmente.

EL AUTOR

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEORICO

1.1 Introducción

Actualmente aumenta cada vez más la necesidad por incrementar la productividad y solicitar productos terminados de calidad uniforme, por lo que la industria esta inclinándose cada vez más por la automatización basada en computadoras. Actualmente la mayoría de fábricas automatizadas requieren máquinas de propósitos especiales diseñadas para ejecutar funciones predeterminadas en los procesos de fabricación, pero la inflexibilidad y generalmente los altos costos de esta maquinaria, han llevado a interesarse más por el uso de robots capaces de ejecutar una variedad de funciones de fabricación en un ambiente de trabajo flexible y a un menor costo de producción.

Un robot se define en el diccionario como “un dispositivo automático que ejecuta funciones ordinariamente atribuidas a entes humanos”. Con esta definición, una máquina de lavar puede ser considerada como un robot. Una definición usada por el Instituto de Robótica de América da una descripción más precisa de un robot industrial: “Un robot es un manipulador reprogramable multi-funcional diseñado para mover materiales, partes, herramientas, o dispositivos especializados, a través de movimientos programados variables para la ejecución de una variedad de tareas”. En resumen, un robot es un manipulador reprogramable de propósito general, con sensores externos que pueden ejecutar una variedad de tareas de montaje.

Las líneas de montaje y producción en masa fueron introducidas primero por la Ford Motor Company en 1905. En las décadas siguientes, máquinas especializadas han sido diseñadas y desarrolladas para producción en gran volumen de partes mecánicas y eléctricas, de modo que, cuando cada ciclo de producción anual termina y nuevos modelos de las partes son

introducidas, las máquinas especializadas tienen que ser paradas y el hardware reequipado para la siguiente generación de modelos.

La mayoría de robots industriales son ampliamente usados en fabricación y tareas de montaje, especialmente en Japón, en donde se está usando cada vez más robots industriales que realizan tareas específicas en las líneas de montaje, así como en la manipulación y mezcla de sustancias peligrosas o delicadas.

1.2 Desarrollos

Los robots industriales modernos parecen primitivos comparados con la expectativa creada por los medios de comunicación durante las seis décadas pasadas. Los trabajos anteriores guiaron a los robots industriales de hoy, que son trazados al período siguiente a la Segunda Guerra Mundial. Durante 1940 se iniciaron programas de investigación por parte de Oak Ridge y Argonne National Laboratories para desarrollar manipuladores mecánicos controlados remotamente para sostener materiales radiactivos. Estos sistemas fueron del tipo maestro-esclavo, donde los movimientos del brazo y mano eran hechos por un operador humano. En la mitad de 1950 los acopladores mecánicos fueron reemplazados por manipuladores eléctricos e hidráulicos tal como el Handyman de General Electric y el Minotaur construido por General Mills. Desarrollos posteriores por Devol y Joseph F. Engelberger diseñan el primer robot industrial introducido por Unimation Inc. en 1959, la clave de este era el uso de un computador en conjunción con un manipulador para producir una máquina a la que se puede enseñar, ejecutando una variedad de tareas automáticamente.

En 1960 la flexibilidad de estas máquinas fué mejorada significativamente por el uso del sensado realimentado, por ejemplo el MH-1, el cual pudo "sentir" bloques y usando esta información para controlar la mano de modo que apilara bloques sin operador asistente. Este es uno de los primeros ejemplos de un robot capaz de comportamiento adaptivo. Durante el mismo

período, Tomovic y Boni (1962) desarrollaron una mano prototipo equipada con un sensor de presión el cual sensaba el objeto y alimentaba una señal de realimentación de entrada a un motor para iniciar uno de dos patrones de sujeción. En 1963 la American Machine and Foundry Company (AMF) introduce el robot comercial Versatran.

En 1968 McCarthy y un grupo de profesores del Stanford Artificial Intelligence Laboratory reportan el desarrollo de un computador con manos, ojos y oídos, montando un sistema que reconocía mensajes hablados. Durante este período, Pieper estudia el problema cinemático de un manipulador controlado por computadora, mientras que Kahn y Roth (1971) analizan la dinámica y control de un brazo restringido.

Un poco antes de 1968, la compañía japonesa Kawasaki Heavy Industries negocia una licencia con Unimation para sus robots.

En 1974, Cincinnati Milacron introduce el primer robot industrial controlado por computadora, llamado "la herramienta del mañana", o T³, que podía levantar sobre las 100 libras así como mover objetos en una línea de ensamblaje.

Durante la década de los 70's los trabajos de investigación fueron orientados al uso de sensores externos para facilitar las operaciones de manipulación. En Stanford, Bolles y Paul (1973) demostraron un brazo conectado al computador PDP-10 para ensamblar bombas de agua de automóviles. Inoue (1974) en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT trabajó en los aspectos de inteligencia artificial de fuerzas de realimentación. Bejczy en 1974, en el Jet Propulsion Laboratory, implementó una técnica de control de torque basado en computador en el brazo extendido de Stanford para proyectos de exploración espacial. Desde entonces, varios métodos de control han sido propuestos para manipuladores mecánicos.

En la actualidad, la robótica resulta un campo mucho más amplio de trabajo que hace unos años atrás, llegando a investigaciones y desarrollos en un número de áreas interdisciplinarias, que incluyen cinemática, dinámica,

sistemas de planeamiento, control, sensado, lenguajes de programación y máquinas inteligentes, por lo que al paso de los avances tecnológicos y con la ayuda cada vez más importante de las computadoras en el diseño y modelamiento, pronto serán realidad aquellas máquinas inteligentes que nos deslumbran en las películas de ciencia ficción.

1.3 Clasificación

Para comprender mejor la noción de un manipulador robótico, es útil clasificarlos de acuerdo a varios criterios:

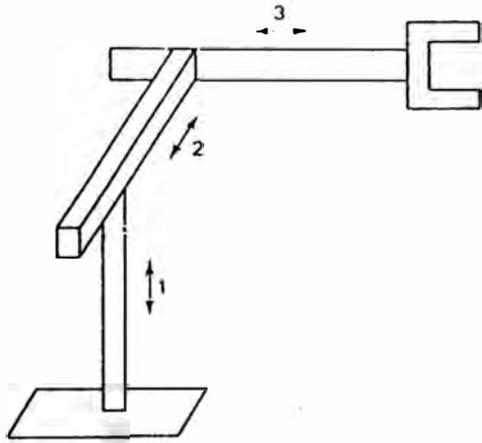
1.3.1 Tecnología

Uno de los mejores esquemas de clasificación esta basado en al fuente de energía usada para llevar las conexiones del robot. Las dos tecnologías más populares son la eléctrica y la hidráulica. La mayoría de los manipuladores robóticos de hoy usan electricidad en la forma de servomotores DC o motores de paso DC, de modo que, cuando se requiera manipulación de alta velocidad de cargas substanciales, los robots hidráulicos se prefieren. Un serio inconveniente de los robots hidráulicos es su falta de limpieza, una característica que es importante para muchas aplicaciones de montaje.

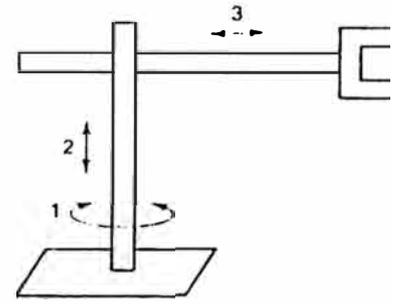
1.3.2. Geometría del entorno de trabajo

Esta determinada por la secuencia de conexiones usada por los primeros tres ejes. Seis tipos de conexiones en robots son posibles, de modo que, sólo dos tipos básicos son comúnmente usados en robots industriales, y se muestran a continuación:

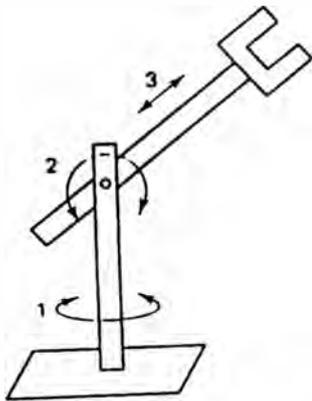
| <u>Tipo</u> | <u>Notación</u> | <u>Símbolo</u> | <u>Descripción</u> |
|-------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Revolución | R |  | Movimiento de rotación alrededor de un eje. |
| Prismática | P |  | Movimiento lineal a lo largo de un eje |



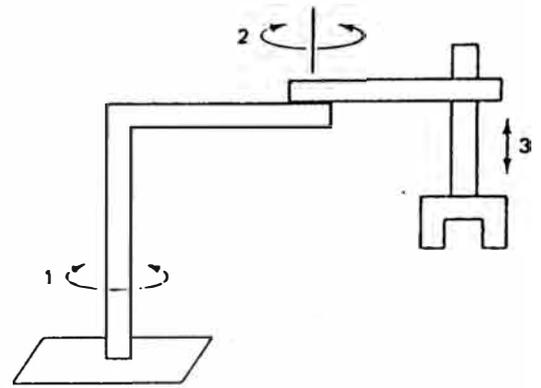
(a) ROBOT CARTESIANO



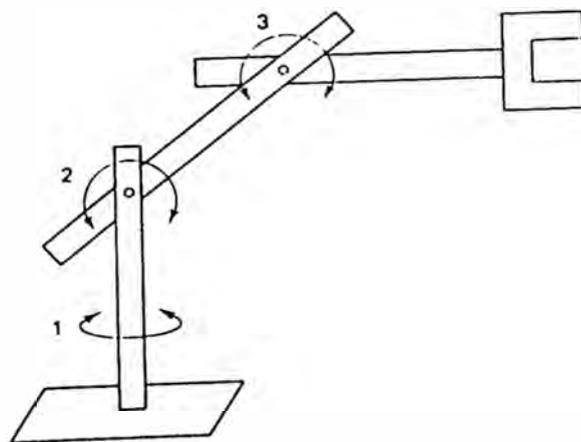
(b) ROBOT CILINDRICO



(c) ROBOT ESFERICO



(d) ROBOT SCARA



(e) ROBOT ARTICULADO

FIG. 1.1

GEOMETRIAS DE TRABAJO

Las juntas de revolución (R) exhiben movimiento de rotación alrededor de un eje, y son los tipos más comunes. El otro tipo común es el prismático (P), el cual exhibe deslizamiento o movimiento lineal a lo largo de un eje. La combinación particular de ambos, determina la geometría del entorno de trabajo, como se muestra a continuación Fig. 1.1:

| <u>Robot</u> | <u>Eje1</u> | <u>Eje2</u> | <u>Eje3</u> | <u>Revolución Total</u> |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|
| Cartesiano | P | P | P | 0 |
| Cilíndrico | P | P | P | 1 |
| Esférico | R | P | P | 2 |
| SCARA | R | P | P | 2 |
| Articulado | R | R | R | 3 |

1.3.3. Métodos de control de movimiento

Otro criterio fundamental de clasificación es el método usado para controlar el movimiento de la herramienta o terminal. Los dos tipos básicos de movimiento se indican a continuación:

| <u>Método de Control</u> | <u>Aplicación</u> |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Punto a punto | Soldadura de punto Levadura a colocar Carga y descarga |
| Camino continuo | Pintado con spray Soldadura de arco Encolado o pegado |

El primer tipo es un movimiento punto a punto, donde la herramienta se mueve a una secuencia discreta de puntos en el espacio de trabajo, donde el camino entre los puntos no es explícitamente controlado por el usuario.

El otro tipo es el movimiento de camino continuo, algunas veces llamado movimiento de camino controlado. Aquí la herramienta debe seguir un

camino predeterminado en el espacio tridimensional y la velocidad de movimiento a lo largo del camino puede variar.

1.4 Especificaciones en Robótica

Aparte de las especificaciones vistas anteriormente hay características adicionales, dentro de ellas las más comunes son:

- * Número de ejes : Sin unidades
- * Capacidad de llevar carga : Kg.
- * Máxima velocidad, tiempo de ciclo : mm/seg.
- * Alcance y contacto : mm
- * Orientación de la herramienta : grados
- * Repetibilidad : mm
- * Precisión y exactitud : mm
- * Entorno operativo : Ninguno

1.5 Cinemática y dinámica de un brazo robot

La cinemática de un brazo robot trata con el estudio analítico de la geometría de movimiento de un brazo robot con respecto a un sistema coordinado de referencia fijo sin considerar las fuerzas y momentos que causan el movimiento. Así, la cinemática trata con la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como una función del tiempo. Hay dos problemas involucrados aquí, que son la cinemática directa y la cinemática inversa. Denavit y Hartenberg en 1955 proponen un método sistemático y generalizado, utilizando algebra matricial para describir y representar la geometría espacial de las uniones de un brazo robot con respecto a una estructura de referencia fija, el cual usa matrices de transformación homogéneas de 4x4 para describir el problema de cinemática directa.

Estas matrices de transformación homogéneas también son usuales para derivar las ecuaciones del movimiento dinámico de un brazo robot.

La dinámica de un brazo robot trata con la formulación matemática de las ecuaciones de movimiento de un brazo robot, tales ecuaciones son usuales para la simulación en computadora. Estudios convencionales, tales como las formulaciones de Newton·Euler o Lagrange·Euler pueden ser aplicadas sistemáticamente para desarrollar las actuales ecuaciones de movimiento de un brazo robot.

1.6 Sensado en robots

El uso de mecanismos de sensado externos permite a un robot interactuar con el entorno de manera flexible esto en contraste con las operaciones preprogramadas en las cuales un robot es "enseñado" a ejecutar ordenes repetitivas por medio de un conjunto de funciones programadas. Actualmente los robots industriales usan una tecnología de sensado con un mayor grado de inteligencia en el tratamiento de su entorno, lo que está permitiendo mayores investigaciones y desarrollos en el campo de la robótica.

La función de sensado en robots se puede dividir en dos categorías principales: estado interno y estado externo. Los sensores de estado interno tratan con la detección de variables tales como la posición de la unión del brazo, que son usados para controlar el robot. Los sensores de estado externo permiten la detección de variables tales como el rango, proximidad y contacto, que son usados para guiar al robot así como identificar y sostener objetos.

La visión en robots puede como el proceso de extraer, caracterizar e interpretar información de imágenes del mundo tridimensional, este proceso comúnmente se designa como visión de máquina o computadora, y puede dividirse en seis áreas principales:

- * Sensado
- * Preprocesamiento

- * Segmentación
- * Descripción
- * Reconocimiento e
- * Interpretación

Esto es conveniente para agrupar estas áreas de visión de acuerdo a la sofisticación involucrada en su implementación, en el que generalmente se consideran tres niveles de procesamiento: visión baja, media y alta.

CAPITULO II

MODELOS AUTOMATIZADOS PARA MODELAMIENTO.

2.1 Simulación de sistemas físicos a partir de modelos geométricos

Programar los modelos, donde el código para el montaje automático de objetos se deriva desde la descripción de las bases de datos del montaje, ha sido el sueño de los investigadores. Un primer paso hacia la programación del modelo, que no requiere una solución para problemas de movimiento planificado es un modelo de simulación de un sistema. Tal sistema requiere un algoritmo de detección de colisión, pero no un algoritmo completo de movimiento planeado.

Cuando consideramos como usar una estrategia propuesta para movimiento planificado, debe ser una simulación geométrica emulada por un programa. Consideremos el procedimiento alcanzado por la bisagra plana la cual se realiza por la situación geométrica así como la fricción entre las bisagras planas en la mesa de trabajo, esto no puede ser verificado por un sistema basado puramente en geometría, sino que necesitamos sistemas de simulación de modelos, que dupliquen el comportamiento real en los lugares de trabajo. Tal sistema necesitará la capacidad para simular movimiento de objetos sometidos a fuerzas externas, y podrá usarse para verificar muchos otros aspectos de la programación de robots.

De hecho, tales sistemas de simulación conducirán desde el modelo geométrico, el cual tendrá una amplia aplicabilidad, que será usada en prototipos electrónicos para verificar aspectos del diseño tales como remover tarjetas de un computador o enfoque apropiado de una antena de satélite. Esto será usado para simular el trabajo de mecanismos, sea para diseño refinado o para entrenamiento, lo cual viene a ser la base de una sofisticada herramienta para análisis y diseño de ingeniería.

Describimos un sistema de simulación general que es diseñado para ser extensible y ser capaz de automodificar modelos de objetos para contar los cambios imprevistos en las configuraciones del objeto. En tales sistemas debe ser posible definir colecciones arbitrarias de objetos y simular sus comportamientos físicos en una multiplicidad de dominios, incluyendo la geometría, dinámica y aspectos de control de modelos.

Globalmente , el sistema está dividido en tres partes: definición del sistema, análisis del sistema y reporte del sistema. La organización del sistema se muestra en la figura 2.1.

2.1.1. Definición del sistema

Los objetos se dice que son primitivos o compuestos. Un objeto primitivo es un cuerpo rígido de forma espacial. Los objetos compuestos consisten de un número de objetos primitivos que están unidos por bisagras generalizadas. Todos los objetos son modelados en un número de dominios describiendo categorías de comportamiento, donde en cada dominio se construye un modelo con las características relevantes del objeto. Por ejemplo, en el dominio geométrico la forma se describe, y en el dominio dinámico las ecuaciones de movimiento del objeto son formuladas. El conjunto de modelos describiendo un objeto primitivo es ligeramente correcto, luego un objeto complejo se describe en cada dominio combinando los modelos de sus componentes primitivos, y haciendo ciertas modificaciones y añadiéndolos a los modelos de componentes. Los diferentes modelos de dominio específico son coordinados a través de diseños de interfaces fijas, por lo tanto para que un sistema sea viable, debe ser posible extender la lista de dominios de modelamiento como el sistema completo y usarlo en un amplio rango de aplicaciones.

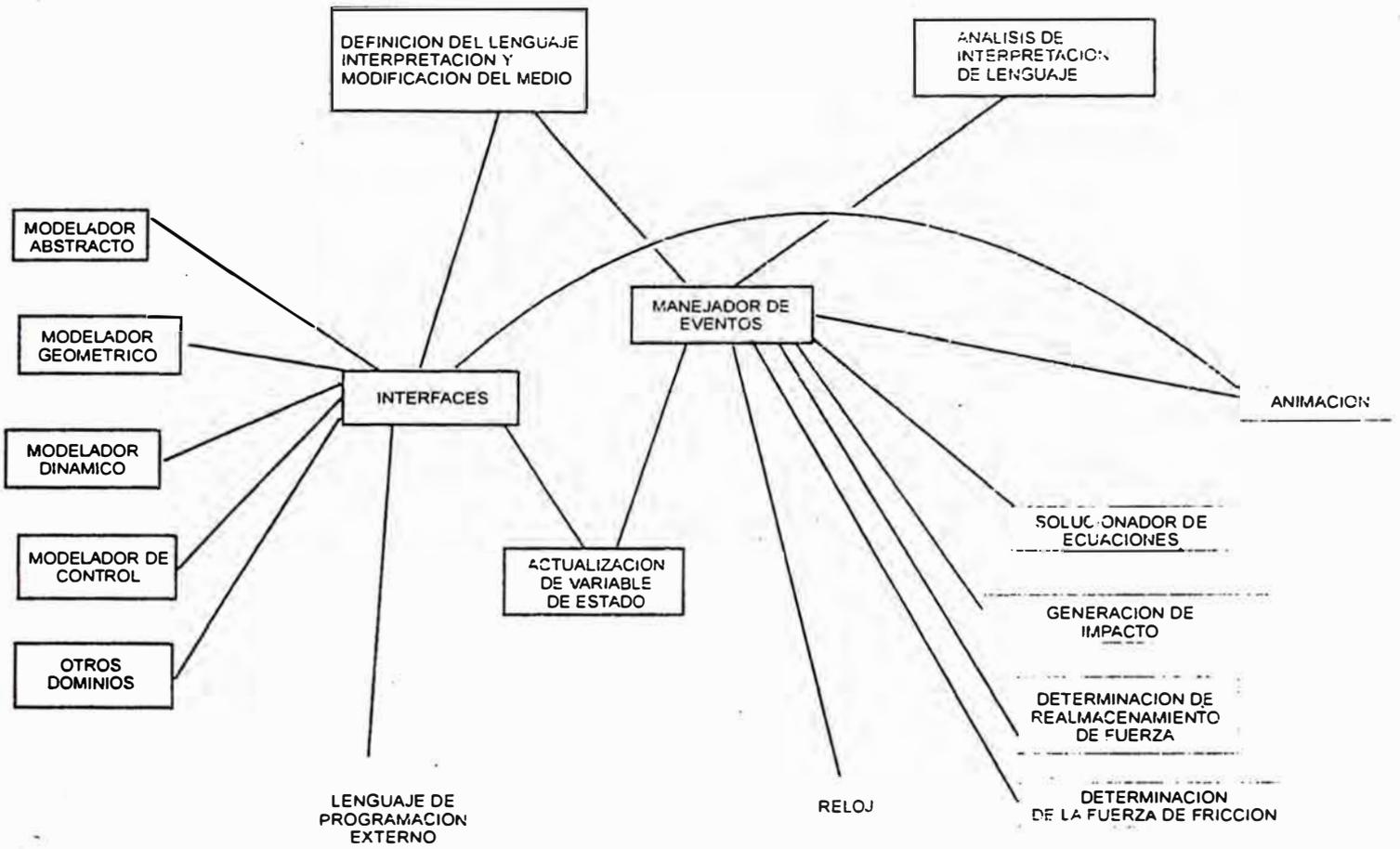


FIG. 2.1 ORGANIZACION DEL SISTEMA

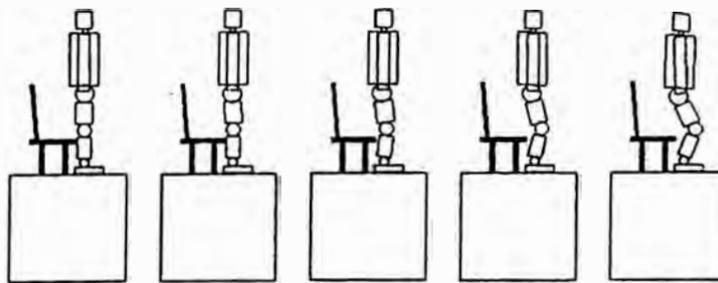


FIG. 2.2

FIGURA ANTROPOMORFICA EN MOVIMIENTO

2.1.1.1 Modelo abstracto

El modelo abstracto de un objeto consiste de un nombre y una lista de propiedades conteniendo material, densidad, color, etc. Un objeto compuesto se representa por un gráfico cuyos vértices representan objetos primitivos y cuyos bordes representan relaciones entre estos objetos. Ejemplos de relaciones son: contacto, conexión rígida, bisagras de una forma particular, etc. Por ejemplo, consideremos una forma antropomorfa mostrando una secuencia de movimiento en la figura. 2.2. Consiste de varios cuerpos rígidos enlazados por uniones de revolución, donde para cada cuerpo rígido, hay un modelo abstracto separado guardando propiedades tales como densidad y color, así como el hecho que estos cuerpos son componentes de un objeto compuesto. De las propiedades especificadas, se derivan otras características, por ejemplo, usando las propiedades de densidad y volumen del modelo geométrico, se determinan la masa y la inercia de un objeto primitivo, y dado el material, podemos alimentar automáticamente modelos simples de fricción. Pueden agregarse otras propiedades cuando sea conveniente, tal como la elasticidad, cuando se modelen cuerpos deformables.

2.1.1.2. Modelos geométricos

Los subsistemas de modelamiento geométrico representan la forma y la posición /orientación de objetos en el espacio tridimensional. En la fase de definición, el subsistema es usado para construir la forma de objetos primitivos y la posición de componentes primitivos, con respecto a cada uno de los otros o relativo a una coordenada global. La operación usual durante la simulación es mover un objeto a una nueva posición u orientación, en suma, los subsistemas soportan un número de capacidades que son necesarias para operaciones automatizadas, incluyendo la ubicación del centroide y el cálculo del volumen, cálculo del tensor de inercia volumétrico, determinando las coordenadas de las características del objeto en la cual

dos objetos primitivos se tocan o intersectan. Para facilitar la coordinación entre los modelos geométricos y dinámicos, se asume que los objetos primitivos son homogéneos, los cuerpos rígidos heterogéneos deben ser modelados como objetos compuestos cuyos componentes primitivos son conectados rígidamente uno a otro. Los objetos compuestos son construidos desde un primitivo por operaciones de composición, donde estas operaciones conectan objetos por bisagras o conexiones rígidas.

2.1.1.3. Modelo de interferencia

En el curso de la simulación se necesita averiguar si algún objeto interfiere, y esto puede hacerse usando el modelo geométrico. El propósito del modelo de interferencia es para permitir pruebas rápidas de no interferencia y reservar las pruebas de interferencia extensa basados en el modelo geométrico para instancias críticas cuando los objetos están muy próximos. En el modelo de interferencia, se define un modelo jerárquico aproximado de objetos que permite probar que dos objetos no se intersectan. Las aproximaciones son construidas usando una forma primitiva básica, conocidas por los sistemas de modelamiento geométrico, y un procedimiento para probar cuando dos formas primitivas se intersectan, se usa comúnmente un cubo como una forma básica primitiva. Los niveles de aproximación son: primero, cada objeto primitivo es encerrado por un único cubo; segundo, el objeto es aproximado como la unión de varios cubos, y como último nivel, los objetos geométricos deben ser intersectados. Otros niveles intermedios pueden agregarse si es necesario.

Un objeto compuesto tiene partes móviles que pueden interferir con otras, así que sólo los componentes primitivos son aproximados. Por ejemplo, las partes móviles del objeto antropomorfo han sido diseñadas para no interferir con las otras, de modo que de ciertos pares de componentes puede conocerse a priori que no interfieren con otros, y este hecho es indicado conectando los cubos correspondientes por una bisagra. En consecuencia,

el modelo de interferencia de un objeto es un gráfico de capas, donde cada capa representa un nivel de abstracción. Cada uno de los vértices del gráfico es la unión de dos formas primitivas, y las orillas del gráfico representan las relaciones de no interferencia.

2.1.1.4. Modelo dinámico

El subsistema de modelamiento dinámico representa un objeto por coordenadas locales, un conjunto de variables de estado y una ecuación esquemática que resume las relaciones entre los cambios a variables de estado, propiedades de independencia del tiempo y fuerzas externas que actúan en el objeto. Alguna información pertinente se obtiene revisando modelos de los objetos en otros dominios, por ejemplo, la masa es determinada obteniendo la densidad del modelo abstracto y el volúmen del modelo geométrico. El modelo dinámico sufre modificaciones substanciales cuando los componentes son combinados en objetos compuestos, por esta razón, la ecuación esquemática es más necesaria que un conjunto de ecuaciones fijas. Dado un conjunto de fuerzas aplicadas, el esquema es usado para construir las ecuaciones propias para una situación específica, más aún, cuando los objetos son combinados en objetos compuestos, ciertas ecuaciones son modificadas para contar las fuerzas internas que aparecen.

Un sólido rígido tiene variables de estado r , p , \dot{r} y ω , correspondiendo a posición, orientación (en los parámetros de Euler) y velocidad angular y lineal. Se debe notar que estas variables son vectores. Hay dos ecuaciones vectoriales esquemáticas de la forma:

$$m\ddot{r} = F \quad J\dot{\omega} + \omega \times J\omega = T$$

donde m es la masa y J el tensor inercia, donde se asume que todas las fuerzas externas son combinadas en una única fuerza resultante F y torque

T, aplicadas al centro de masa. Cuando los objetos primitivos son combinados en objetos compuestos, el conjunto de variables de estado son reunidas. La operación combinada usualmente impone condiciones en las variables de estado asociadas, y desde que estas condiciones involucran dos componentes primitivas, un modelo dinámico compuesto es representado como un gráfico cuyos vértices son los modelos dinámicos de las componentes primitivas del objeto modificado por la adición de fuerzas, y cuyas orillas son las operaciones compuestas y sus ecuaciones implicadas. Hay una operación compuesta primitiva desde la cual la mayoría de otras operaciones compuestas pueden ser derivadas. Esta operación primitiva fuerza un punto en un segundo objeto a quedar en contacto con una superficie en el primer objeto, así fuerza un grado de libertad en el movimiento relativo de los dos objetos, el punto forzado se llama punto bisagra. Cuando se componen dos objetos por esta primitiva, se necesita identificar una superficie de una componente primitiva del primer objeto y un punto en una componente primitiva del segundo objeto. La ecuación forzando la linealidad relaciona las aceleraciones relativas de las respectivas componentes primitivas, más aún, la fuerza X transmitida al punto bisagra es normal a la superficie de contacto. Luego, la ecuación de movimiento esquemática de las dos componentes primitivas debe ser modificada, donde X por convención actúa negativamente en la primera, y positivamente en la segunda componente, así, cuando se componen los dos cuerpos rígidos, resultan las siguientes ecuaciones:

$$m_1 \ddot{r}_1 = F_1 - X$$

$$m_2 \ddot{r}_2 = F_2 + X$$

$$J_1 \dot{\omega}_1 + \omega_1 \times J \omega_1 = T_1 - c_1 \times X$$

$$J_2 \dot{\omega}_2 + \omega_2 \times J \omega_2 = T_2 + c_2 \times X$$

En este esquema m_i es la masa del cuerpo i , J_i su tensor inercia, F_i es la fuerza externa resultante, T_i el torque externo resultante en el cuerpo i , c_i es el vector del centro de masa al punto bisagra, para el cuerpo i . Dados fuerzas y torques externos, los dos cuerpos unidos cuentan con 12 ecuaciones escalares con 15 variables. Tres ecuaciones escalares se agregan por la bisagra primitiva, y asumiendo que no hay fricción en el punto de contacto, dos de estas ecuaciones son:

$$s_1 \cdot X = 0$$

$$s_2 \cdot X = 0$$

donde las s_i son dos vectores linealmente independientes paralelos al plano de contacto, con ello se indica que la fuerza debe actuar normal al plano de contacto, la tercera ecuación expresa que el punto queda en contacto con el plano, y esto se deriva de la ecuación:

$$n \cdot v_p = 0$$

donde n es la normal al plano de contacto. Si la bisagra es debida al contacto temporal de los dos cuerpos, un vértice del cuerpo 2 toca una superficie del cuerpo 1, entonces la bisagra resultante no puede sostener la tensión, en consecuencia, cuando X tiende a cero o es negativo, la bisagra "se rompe" y la fuerza X así como las tres ecuaciones deben eliminarse, y de acuerdo a esto hay una operación de ruptura de bisagra que cambia las ecuaciones del modelo dinámico.

2.1.2. Análisis del sistema

La mayoría de componentes están empaquetados, que integran las ecuaciones diferenciales que llevan en la simulación dinámica, una rutina de mantenimiento de eventos que analiza las soluciones de las ecuaciones detectando eventos excepcionales, altera los modelos definiendo la escena o actualizando los estados, y un lenguaje componente que por simulación

programa instrucciones de agentes activos en la escena, y presenta estímulos externos a la simula

2.1.2.1 Paquete de simulación

El paquete de simulación integra numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales, modelando el comportamiento de objetos en varios dominios. Estas ecuaciones son determinadas como sigue: Usando valores principales, todas las funciones programadas del modelo de control son evaluadas, sustituyendo los valores resultantes, todas las ecuaciones dinámicas (escalares) y las ecuaciones del modelo de control que queda son obtenidas por el evento sostén y son presentadas al sistema de simulación. Estas ecuaciones son de la forma:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

donde \mathbf{x} es un vector de aceleración y fuerza. La entrada escalar de la matriz \mathbf{A} y el vector \mathbf{b} son funciones de variables de estado, estímulos externos y tiempo. Eventos excepcionales resultan en cambios a esta ecuación del sistema, incluyendo la introducción o desaparición de incógnitas. Es posible que el sistema de ecuaciones sea singular, en este caso, deben hacerse consideraciones adicionales. Una vez que \mathbf{x} ha sido determinada en el tiempo t , todas las variables de estado pueden ser actualizadas. y antes de hacer esto es preciso examinar \mathbf{x} para comprobar que hayan ocurrido eventos excepcionales.

2.1.2.2. Manejador de eventos

El manejador de eventos examina las variables de estado después de cada paso de integración para determinar si un evento ha ocurrido que requiera modificación del sistema de ecuaciones. Pueden reconocerse los siguientes eventos excepcionales:

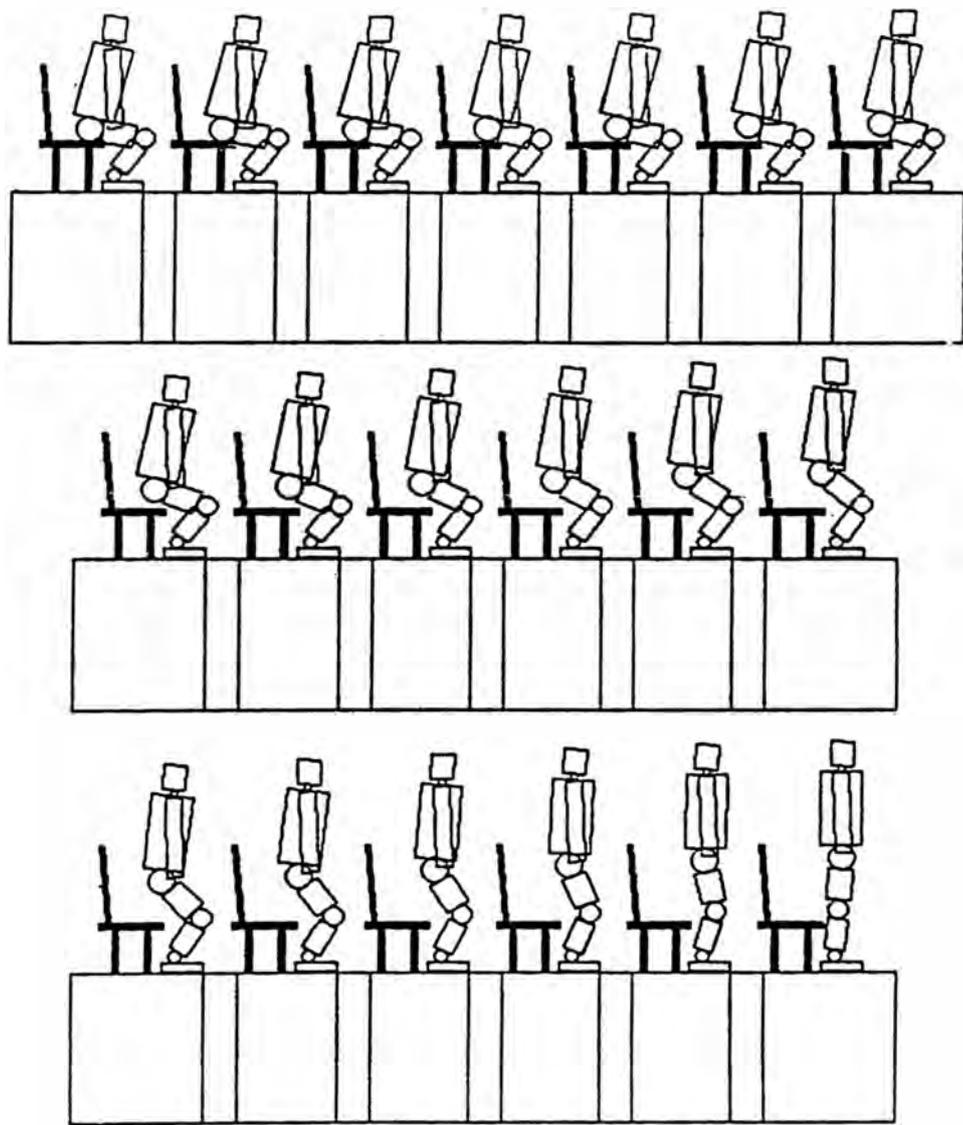


FIG. 2.3 SIMULACION DE UNA SECUENCIA

- * Con las variables de estado actualizadas, el modelo geométrico indica una interpretación de dos objetos. El momento del primer contacto se determina por interpolación o subdivisión repetida e integración, entonces un impacto es modelado, y del impacto todas las velocidades son actualizadas. Si el contacto persiste, por ejemplo inelasticidad del impacto o como resultado de la fricción, los dos cuerpos primitivos son conectados por una bisagra sólo de presión. Esto causa la actualización del modelo y la construcción de un objeto compuesto.
- * La fuerza reactiva manteniendo un contacto físico entre dos objetos viene a ser negativa.
- * El sistema $Ax = b$ es linealmente dependiente, esto ayuda típicamente cuando un cuerpo rígido está en contacto en más de seis puntos y la fuerza de contacto es desconocida. En esta situación se necesita un modelo de contacto más sofisticado.
- * El sistema $Ax = b$ no tiene solución, típicamente una variable controlada no puede ser satisfecha. Por ejemplo, podemos prescribir el movimiento de dos varillas en una manera que requiera que las varillas se penetren, en este caso el modelo es deficiente, y la simulación no puede continuar.
- * Luego que todos los eventos excepcionales han sido numerados, se tendrá un nuevo sistema de ecuaciones, que se presentará a la simulación del sistema. Por ejemplo, consideremos la simulación de la secuencia mostrada en la figura 2.3. donde una figura antropomórfica levanta de su posición de sentado. Una repetición de la simulación actual se muestra en la cual ciertas tomas de la secuencia de animación son colocadas lado a lado. A través de la simulación de esta secuencia de movimiento, los siguientes ciclos son iterados y el modelo de control requiere valores actuales de la variable de estado y presenta nuevos valores de torque. Basados en los valores actuales de la variable de estado y torques, así como la gravedad, las ecuaciones de movimiento son coleccionadas y sus términos son evaluados, produciendo un sistema de ecuaciones lineales, este sistema

resuelto da como resultado aceleraciones y fuerzas que son examinadas.

2.1.2.3. Impacto

El impacto de dos cuerpos es modelado en la manera usual como un evento infinitesimal que lleva cambios de velocidad instantánea sin cambios de posición. Las ecuaciones esquemáticas que gobiernan la respuesta a fuerzas impulsivas y torques son:

$$m \Delta \dot{r} = F$$

$$J \Delta \omega = T$$

donde F es la fuerza impulsiva aplicada al cuerpo y T es un torque impulsivo aplicado al cuerpo, $\Delta \omega$ es el cambio en la velocidad angular y $\Delta \dot{r}$ el cambio en la velocidad lineal en el centro de masa.

En una colisión sin fricción, hay una fuerza impulsiva que actúa normal al plano tangente común del punto de colisión, de magnitud desconocida, y puede determinarse por la ecuación:

$$v^A = -e v^B$$

relacionando la velocidad de acercamiento relativa v^B de los puntos de colisión justo previo al impacto, a la velocidad de separación relativa v^A inmediatamente después del impacto, en la dirección normal al plano tangente común. Aquí e es el coeficiente de restitución que depende del material de los dos cuerpos que colisionan, la geometría de las características de impacto y la velocidad de acercamiento. El coeficiente está en el rango $0 \leq e \leq 1$. Como primera aproximación, e puede tomarse como una constante derivada de los materiales de los cuerpos que colisionan. La situación es completamente análoga a la determinación de fuerzas en ecuaciones de movimiento en conjunción con las ecuaciones cinemáticas. Notar que las fuerzas no impulsivas no tienen influencia en el comportamiento, desde que las fuerzas impulsivas son mucho más grandes

por comparación, de modo que los impactos pueden ser simulados usando un sistema de ecuaciones análogo pero separado.

2.1.2.4. Fuerzas restauradoras

Cuando un cuerpo rígido está soportado estáticamente en más de seis puntos durante la simulación, entonces el sistema $Ax = b$ será indeterminado. Estos puntos de soporte corresponderán a enlaces permanentes, y el modelo debe ser reformulado. De modo que cuando los cuerpos tengan múltiples contactos, el problema no puede ser eludido (Fig. 2.4) . Aquí el bloque A descansa en tres bloques iguales B_i , asumiendo que todos los cuerpos son perfectamente rígidos, no es posible determinar la carga exacta soportada por cada bloque B_i . Una vía posible de mantener esta situación es la de permitir la interpenetración infinitesimal y restauración de fuerzas, en efecto, uno ahora conceptualiza el área de contacto como elástica con restauración de fuerzas proporcionales a la interpenetración. Se asume que todas las fuerzas actúan en el cuerpo en el instante t , entonces se calcula la aceleración resultante para el tiempo $t+\Delta t$ mientras se conserva el contacto de las fuerzas sin cambiar, hasta determinar una velocidad. Para cada punto de contacto se calcula la velocidad relativa de acercamiento v y considerando la componente v_n normal al plano de contacto, entonces la fuerza de contacto incrementada debe ser proporcional a la interpenetración relativa, que se agregan como ecuaciones de la forma:

$$\Delta F_i = k d_i$$

donde k es la normal en el contacto rígido y d_i es la profundidad de interpenetración en el punto de contacto i -ésimo

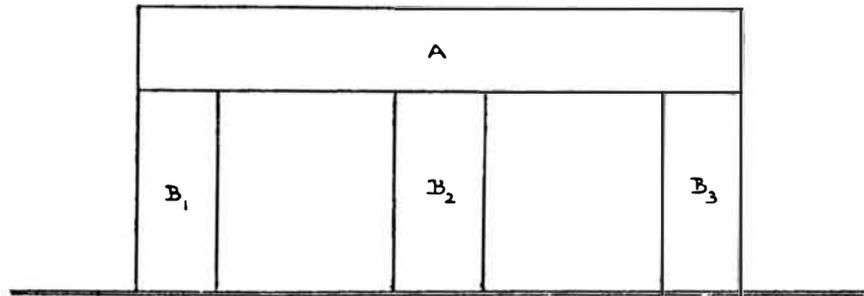


FIG. 2.4 MULTIPLES CONTACTOS

2.1.2.5. Fricción:

La fricción entre cuerpos en contacto es difícil de modelar analíticamente. Los modelos simples asumen una fuerza de fricción de magnitud μN donde μ es una constante que depende del material y de las características de la superficie, y N es la magnitud de la fuerza normal en el punto de contacto. La dirección de la fuerza de fricción es siempre opuesta al movimiento resultante. Una dificultad típica estriba en el hecho del desconocimiento de la distribución precisa de la fuerza sobre el área de contacto, de modo que si ocurre deslizamiento, entonces el movimiento resultante puede depender de otra distribución. Un tratamiento más preciso de la fricción es posible si la fuerza de fricción se determina por iteración, en el paso inicial, la fuerza de fricción en el tiempo t se aplica para determinar la solución del sistema para tiempos $t=\Delta t$. A continuación, las fuerzas normales son recalculados y usados para refinar la estimación de la fuerza de fricción asumida inicialmente, y el cálculo es repetido.

2.1.2.6. Consideraciones de interfase

El aspecto clave para el paquete de análisis y su ampliación es la concepción de un manejador de eventos. Básicamente, el manejador de eventos implementa la mayoría de pasos de simulación en niveles de interfase operativos, en consecuencia, esta no es una forma dependiente de la implementación del subsistema de modelamiento. Idealmente, el manejador de eventos será programado por el usuario en lenguaje analítico de alto nivel, el cual aún no se tiene a la mano, por lo que el usuario sólo puede hacer elecciones mínimas directamente afectando la simulación. El total de interacción entre el análisis y los sistemas de modelamiento se provee por una rutina de colección de ecuaciones, una rutina para chequear que se incrementan las variables de estado y se realiza el sensado de las fuerzas, y una rutina para actualizar los valores de las variables de estado. Estas rutinas se distribuyen primariamente con cantidades vectoriales y trabajan con la implementación independiente de estructuras de datos. Notar que los modelos de control usan entradas basadas en los ciclos de simulación previos. Si no hay interferencias, la actualización es permanente.

2.1.3. Reporte del sistema

El sistema reporta salidas que muestran como progresa la simulación resumiendo ciertos aspectos. En la versión actual del sistema, se genera una animación mostrando el modelo geométrico actualizado en intervalos regulares, donde es posible almacenar la secuencia de animación y repetirla, también existen herramientas para realizar instrumentación en varias partes del sistema, así se puede monitorear variables seleccionadas y mostrar ecuaciones de movimiento en ciertos instantes. Eventualmente los reportes del sistema deben ser mejorados para formular interfaces sistemáticas para resumir eventos claves o para monitorear ciertas variables de estado.

Esta es una descripción de un sistema de simulación experimental en el cual se simula la geometría, dinámica y comportamiento controlado de la

interacción física de los objetos. Las principales características de diseño incluyen modularidad y amplitud del sistema, una interfase de usuario flexible y amigable y la capacidad de automodificar los modelos en respuesta a situaciones excepcionales, tales como colisiones no aceptadas. El sistema se usa para desarrollar interfaces de usuario que simplificarán la construcción de simulaciones y eventualmente, para experimentación con diferentes estrategias como coger y rotar objetos.

2.2. Definición de trayectorias para un manipulador

El control de las trayectorias de manipuladores de alta velocidad, lo proporciona el análisis del sistema dinámico completo. Las velocidades y aceleraciones/desaceleraciones son admisibles a lo largo del camino prescrito y dependen de todas las fuerzas y torques que actúan a lo largo del camino, así como las restricciones dadas por el camino geométrico y por las restricciones de las fuerzas y torques de las uniones. La máxima capacidad de velocidad del camino de un manipulador será expresada por un tiempo de trayectoria mínimo, el cual usa la máxima potencia de aceleración/desaceleración del manipulador. Una distribución de velocidades usando algún otro criterio de optimización queda bajo el caso de tiempo mínimo, y la determinación de cual debe ser el primer paso en la definición de la trayectoria o en un diseño de control de trayectoria, y esto es necesario para proceder a evaluar soluciones de tiempo mínimo, y serán simples y fáciles de aplicar cuando sea posible, a pesar del carácter altamente no lineal del manipulador dinámico. Se presenta el análisis del camino prescrito de un manipulador con un número de grados de libertad de traslación y rotación obligados por torques y fuerzas límites en las uniones y por la geometría de la trayectoria prescrita. Esta geometría obliga a guiar el movimiento sólo con un grado de libertad, expresado por el camino s (Fig. 2.5) , donde transformando todas las ecuaciones del movimiento a las coordenadas s , dan como resultado el manipulador f unido a un conjunto de f

ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales que contienen caminos de aceleración en forma lineal, velocidad en forma cuadrática y las coordenadas en términos no lineales, el fenómeno de fricción es despreciable. Incluyendo el torque o fuerza de las uniones en estas ecuaciones, da como resultado el espacio de fase encerrado por $2f$ superficies, más aún, considerando estas superficies como límites para aceleraciones máximas/mínimas de cada velocidad puntual, un campo de extremos puede construirse que contenga una manera transparente de tener la solución mínima de tiempo. Adicionalmente, el concepto de movimiento en un grado de libertad y el conjunto transformado de ecuaciones del movimiento, permiten la aplicación eficiente de un algoritmo de programación dinámica para optimizar trayectorias de acuerdo a otros criterios que el tiempo mínimo.

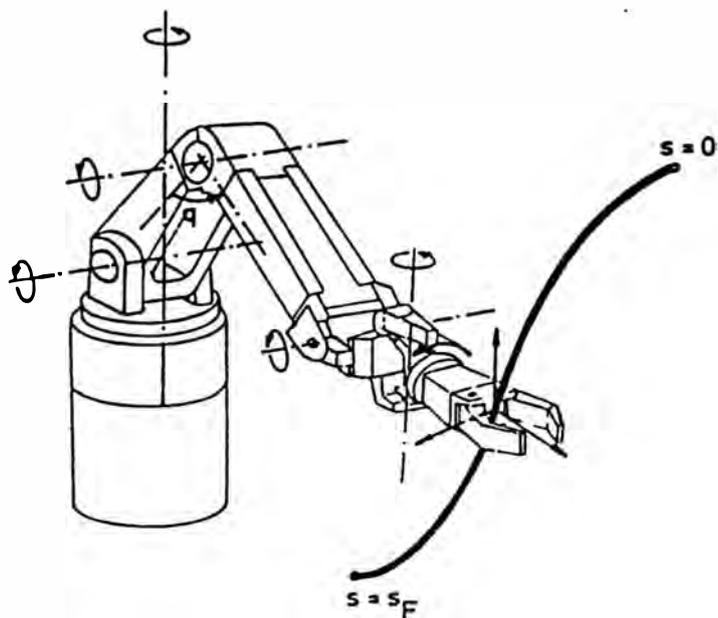


FIG. 2.5 POSICION Y ORIENTACION PRESCRITA

2.2.1. Modelo matemático

Las ecuaciones de movimiento de un manipulador con f componentes puede escribirse de la forma:

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{q}}^T [(\partial \mathbf{M}_i^T / \partial \mathbf{q}) - \frac{1}{2} (\partial \mathbf{M} / \partial \mathbf{q}_i)] \dot{\mathbf{q}} + \partial V / \partial \mathbf{q}_i = \mathbf{T}_i ,$$

$$i = 1, 2, \dots, f \dots \dots \dots (1)$$

\mathbf{M} es la matriz masa ($f \times f$), \mathbf{M}_i es la i -ésima fila de \mathbf{M} , \mathbf{q} el vector de las coordenadas de la unión y V el potencial gravitacional. La cantidad escalar T_i que designa la fuerza o torque que actúa en la unión i . El término entre corchetes representa el símbolo de Christoffel.

Un camino prescrito de manera perfecta es un movimiento con un grado de libertad representado por el camino de coordenadas s , con $0 \leq s \leq s_F$ donde s_F es el punto final del camino. Ahora con al ayuda de:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}' \dot{s}, \quad \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}' \ddot{s} + \mathbf{q}'' \dot{s}^2 \dots \dots \dots (2)$$

que pueden transformarse a:

$$\mathbf{A}_i(s) \ddot{s} + \mathbf{B}_i(s) \dot{s}^2 + \mathbf{C}_i(s) = \mathbf{T}_i(s)$$

$$i = 1, 2, \dots, f \dots \dots \dots (3)$$

La primera expresión representa la fuerza de inercia, la segunda giroscópica, y la tercera la fuerza gravitacional. Se usan las siguientes abreviaciones:

$$\mathbf{A}_i(s) = \mathbf{M}_i \mathbf{q}'$$

$$\mathbf{B}_i(s) = \mathbf{M}_i \mathbf{q}'' + \mathbf{q}'^T [(\partial \mathbf{M}_i^T / \partial \mathbf{q}) - \frac{1}{2} (\partial \mathbf{M} / \partial \mathbf{q}_i)] \mathbf{q}'$$

$$\mathbf{C}_i(s) = \partial V / \partial \mathbf{q}_i \dots \dots \dots (4)$$

La ecuación (3) es una ecuación diferencial de segundo orden con el tiempo como variable independiente y el camino coordinado s como variable dependiente, y puede transformarse a una ecuación diferencial de primer orden en (\dot{s}^2, s) usando la relación:

$$\ddot{s} = d\dot{s}/dt = (d\dot{s}/ds)(ds/dt) = \dot{s}' s = \frac{1}{2} (\dot{s}^2)' \dots\dots\dots(5)$$

y con (4) (5) y (3) se puede resolver fácilmente por cuadratura formal:

$$\dot{s}^2(s) = \left[\dot{s}^2(s_0) + \int_{s_0}^s \exp\left(\int_{s_0}^v 2B_i/A_i du\right) * 2(T_i - C_i)/A_i dv \right] * \exp\left(-\int_{s_0}^s 2B_i/A_i du\right) \dots\dots\dots(6)$$

La solución de (6) será usual para procedimientos computacionales. Las derivadas q' , q'' pueden evaluarse usando algunas fórmulas de la geometría diferencial. La relación $r = r(q)$ y el Jacobiano $(\partial r/\partial q)$ usualmente están establecidas sin problema por algún manipulador (Fig. 2.5), mientras que $q = q(r)$ representa el problema inverso del manipulador cinemático. Por otro lado la geometría del camino prescrito puede darse en la forma $r^T = (x,y,z)$ en forma de tablas o como un conjunto de tablas. Así se calcula:

$$q' = (\partial r/\partial q)^{-1} r'$$

$$q' = (\partial r/\partial q)^T [(\partial r/\partial q)(\partial r/\partial q)^T]^{-1} r'$$

$$q'' = (\partial r/\partial q)^{-1} [r'' - (\partial r/\partial q)' q'] \dots\dots\dots(7)$$

La ecuación (7) anticipa el hecho de que en lo sucesivo sólo se considere el movimiento a lo largo de una sola trayectoria..

2.2.2 La trayectoria de tiempo mínimo

El movimiento del manipulador a lo largo de una trayectoria prescrita es forzada por la geometría del camino y por los límites en las uniones de los torques y fuerzas. El torque o fuerza puede darse por:

$$T_{i,\min} \leq T_i \leq T_{i,\max} \dots\dots\dots (8)$$

insertando en (4) , produce:

$$A_i(\mathbf{s}) \ddot{\mathbf{s}} + B_i(\mathbf{s}) \dot{\mathbf{s}}^2 \leq T_{i,\max} - C_i(\mathbf{s})$$

$$A_i(\mathbf{s}) \ddot{\mathbf{s}} + B_i(\mathbf{s}) \dot{\mathbf{s}}^2 \geq T_{i,\max} - C_i(\mathbf{s}) , \quad i = 1, 2, \dots, f \quad (9)$$

Tomando sólo el signo igual, las desigualdades (9) pueden considerarse como las ecuaciones de dos líneas rectas en el plano $\ddot{\mathbf{s}} - \dot{\mathbf{s}}^2$ para \mathbf{s} constante.

Para cada unión i tenemos un par de líneas rectas formando en conjunto un polígono en el plano (Fig. 2.6). El movimiento puede tomar lugar sólo en el interior de este polígono mientras las condiciones iniciales se cumplan. Para cada punto del camino \mathbf{s} , se tiene un polígono de diferente forma.

El polígono de la Fig. 2.6 representa un corte a través de una configuración tridimensional como en la Fig. 2.7 para un camino de puntos \mathbf{s} . La colección de estos puntos extremos a lo largo de \mathbf{s} da como resultado el contorno curvo de la Fig. 2.7. Para cada \mathbf{s} menor que \mathbf{s}_{\max} del polígono conseguimos dos valores extremos para \mathbf{s} , los cuales son la aceleración/desaceleración máxima y mínima posible dentro de los límites geométricos y el torque y la fuerza para el camino considerado. El problema del tiempo mínimo ahora puede reducirse al problema de hallar la curva en el plano $\mathbf{s}-\dot{\mathbf{s}}$ la cual es tan grande como sea posible para una ganancia de

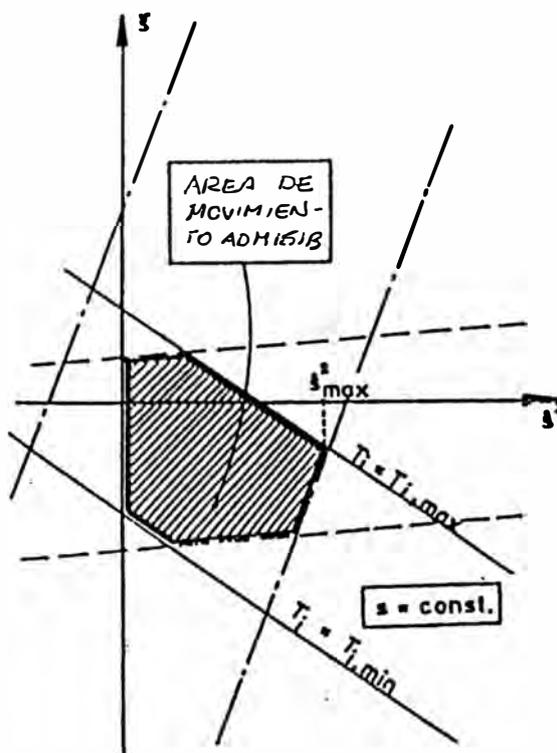


FIG. 2.6 POLIGONO DE MOVIMIENTO ADMISIBLE

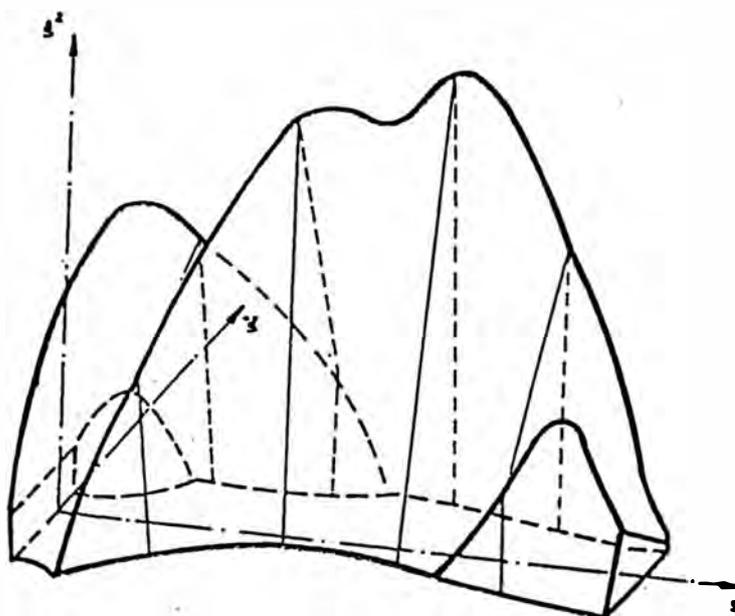


FIG. 2.7 ESPACIO DE FASE FORZADO

tiempo óptima. Se puede considerar un algoritmo para construir la trayectoria de tiempo óptima en el plano de fase como sigue:

1. Se construye desde el punto de partida el camino al extremo con aceleración máxima y desde el punto final el camino al extremo con desaceleración máxima (Fig. 2.8a)
2. Si estos dos extremos se interceptan, la trayectoria de tiempo óptimo se conoce y el algoritmo termina.
3. De otro modo, alcanzar en la curva frontera $\dot{s}_{\max}(\mathbf{s})$ para un punto crítico, donde un cambio toma lugar desde una trayectoria sumidero hasta una trayectoria fuente. Al menos un punto crítico debe existir entre el punto final de la aceleración y el punto de partida de la trayectoria de la desaceleración, debido a que el primer punto de la curva frontera es una trayectoria sumidero, y el segundo una trayectoria fuente.
4. Partiendo del punto crítico, construir un extremo de desaceleración atrás y un extremo de aceleración adelante, donde el extremo de atrás intersectará al extremo de máxima aceleración que viene desde el comienzo del camino (Fig. 2.8b).
5. Si el extremo de adelante intersecta al extremo de máxima desaceleración yendo al final del camino a buscar el terminal, de otro modo, existe más de un punto crítico y el algoritmo procede en forma análoga al paso 3 (Fig. 2.8c).

Teniendo así determinado el tiempo de trayectoria óptima en el plano de fase en la forma: $\dot{s}_{\text{opt}} = \dot{s}(\mathbf{s})$, es posible calcular el tiempo en dependencia de s por:

$$t(\mathbf{s}) = \int_1^{s_F} 1/\dot{s}(s) ds \dots\dots\dots(10)$$

Por inversión de (10) obtenemos la trayectoria óptima en la forma deseada, donde s_{opt} depende de t .

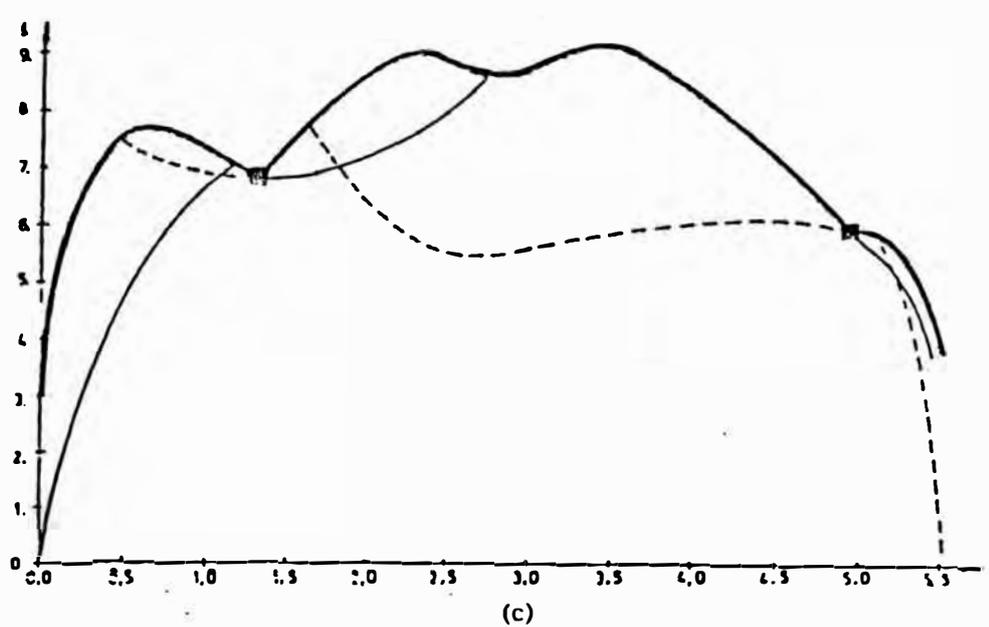
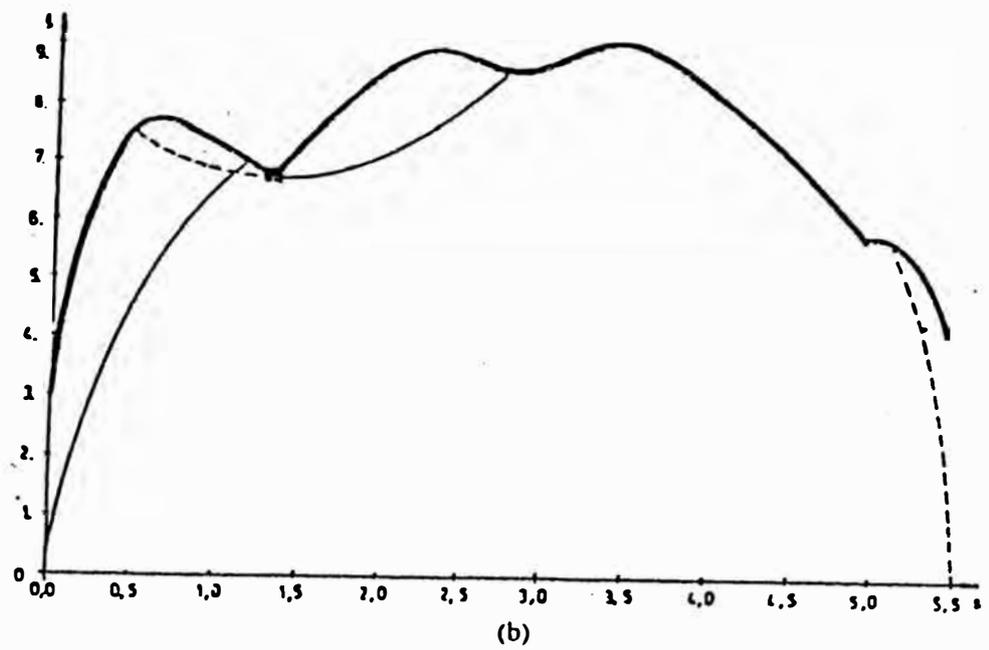
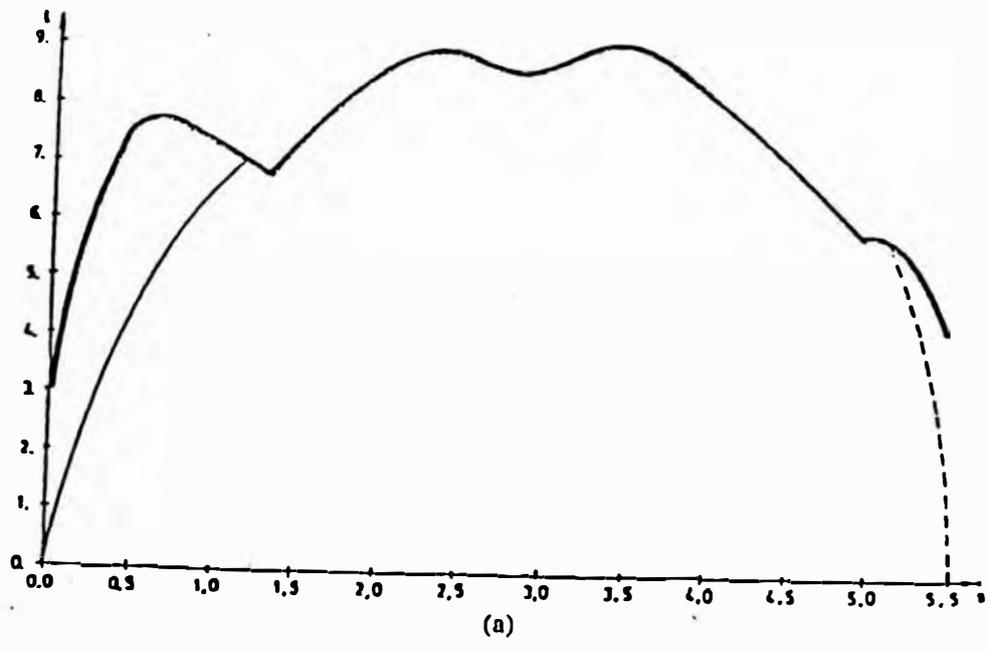


FIG. 2.8 ETA'PA EN LA CONSTRUCCION DE TRAYECTORIAS PTIMAS DE TIEMPO

2.2.3 Optimización general

En algunos casos de relevancia práctica debe ser deseable optimizar el movimiento a lo largo de una trayectoria dada de acuerdo a criterios adicionales. Consideramos tres criterios de performance: tiempo, cuadrado de la velocidad y torques de uniones. El cuadrado de la velocidad es proporcional a la energía cinética. Minimizando los torques de uniones, se produce un efecto de alisado favorable para los motores de uniones y ayuda a evitar la excitación de vibraciones elásticas en el sistema. Combinando los tres criterios por compensación de coeficientes:

$$W = \int_0^{s_f} [w_1(1/\dot{s}) + w_2\dot{s}^2 + w_3 \sum (T_i / T_{i,max})^2] ds \dots\dots\dots(11)$$

Con (3) y la cuadratura formal (6) se poseen ecuaciones para evaluar la distribución de velocidad a lo largo de un camino dado dependiente de los torques de las uniones. Uno de estos torques se puede optimizar de acuerdo a (11), todos los otros torques son entonces determinados por la condición que guarda el tipo de manipulador en la trayectoria prescrita. Una de las uniones controla el movimiento y produce torques que pueden determinarse por los siguientes procedimientos:

1. El movimiento empieza en $s=0$ con una unión de control j , para el cual el valor de la velocidad relativa de la unión gana un máximo valor. Respecto a (2) obtenemos:

$$q'_j = \max_{i=1,\dots,f} q'_i \dots\dots\dots(12)$$

Esto garantiza la mejor controlabilidad del movimiento a lo largo del camino.

2. Durante el movimiento otro torque puede exeder el valor máximo posible $|T_k| > |T_{k,max,min}|$. Entonces el control es transferido a la unión k .

3. Dado el control a la unión j , su torque debe ser calculado por algoritmos de optimización usando (11). De (6) y (3) para $i = j$ se obtiene caminos de velocidad \dot{s} y caminos de aceleración \ddot{s} , desde todos los otros (3) los torques para todas las otras uniones $i \neq j$.

Resolviendo el problema de optimización aplicamos una programación dinámica aproximada. El carácter unidimensional del método provee una ventaja en conexión con el principio de Bellman. Más aún, este principio permite la consideración de fuerzas arbitrarias. Discretizando el espacio de estado (s, \dot{s}) en puntos (s_m, \dot{s}_{mn}) con $m = 1, 2, \dots, M$ y $n = 1, 2, \dots, N$ producido por el criterio de performance (11)

$$W = \sum \bar{w}_m (s_m, s_{m-1}, \dot{s}_{mn}, \dot{s}_{m-1, n-1})$$

$$W_m = W_{m-1} + w_m \dots\dots\dots(13)$$

que la forma necesaria para aplicar el principio de optimización.

La máxima velocidad se conoce de los polígonos para cada s_m , y la ecuación (14) debe ser resuelta numericamente respecto a (3) (6) y (8) y el algoritmo de decisión descrito para el control de las uniones.

Este método está basado principalmente en dos conceptos, el primero concierne a la transformación de las ecuaciones de movimiento al plano coordinado s , representando un grado de libertad del movimiento a lo largo de la trayectoria prescrita; la segunda con la determinación de la solución de tiempo mínimo usando propiedades geométricas del conjunto de ecuaciones transformado. Como un resultado se obtiene la solución de tiempo mínimo exacto en una trayectoria dada, lo cual permite planear trayectorias incluyendo todas las fuerzas y torques, y tomando en cuenta el criterio de que el tiempo permite un formalismo de programación dinámica.

2.3 Control del movimiento coordinado de brazos robots

El control de movimiento coordinado de brazos robots es algunas veces requerido para aplicaciones avanzadas. El control de movimiento coordinado ha sido estudiado por varios autores, donde como coordinar el movimiento de brazos en un camino sin conflicto y como controlar las fuerzas internas aplicadas a los objetos, son los mayores problemas en el control de movimiento coordinado.

En la mayoría de algoritmos de control, los brazos robots se asume que no tienen error geométrico, y la estabilidad no ha sido considerada cuando ocurre una ruptura del objeto. Más aún, un brazo robot tiene errores geométricos causados por parámetros inciertos de su geometría, y estos errores algunas veces pueden provocar fuerzas internas excesivas aplicadas al objeto, luego la estabilidad para la ruptura del objeto es también muy importante para aplicaciones prácticas.

En la arquitectura de control, el movimiento y las fuerzas internas del objeto son resueltas en el movimiento de cada brazo, entonces cada brazo es controlado para reducir el efecto de errores geométricos basados en un modelo de referencia llevado por un sensor de fuerza conectado al final del brazo, bajo la asunción que la ruptura de un objeto ocurre lentamente. La arquitectura de control se aplica experimentalmente a dos brazos planos, cada uno de los cuales tiene tres grados de libertad.

2.3.1. Resolución del movimiento y fuerza/momento

Aquí se derivan las ecuaciones básicas usadas para resolver el movimiento del objeto manipulado en el movimiento de cada brazo. Consideremos n brazos robots mantenidos a un objeto rígido como se muestra en la Fig. 2.9 , se asume que cada brazo ejerce fuerza y momento en el objeto.

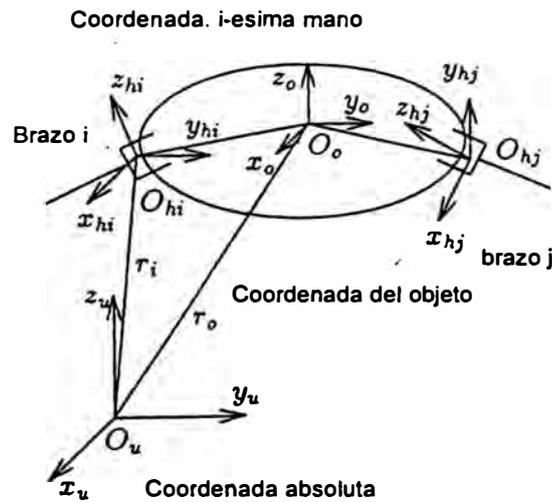


FIG. 2.9 SISTEMA COORDENADO

Se define el sistema de coordenadas como sigue:

$O_u - x_u y_u z_u$

Sistema de coordenadas absoluto

$O_o - x_o y_o z_o$

Sistema de coordenadas del objeto fijo en el centro de masa del objeto.

$O_{hi} - x_{hi} y_{hi} z_{hi}$

i-ésimo sistema de coordenadas fijo en el extremo del brazo *i*-ésimo, la fuerza y momento se asume que se ejercen alrededor de O_{hi} por el *i*-ésimo brazo.

También se usa las notaciones definidas como sigue:

$r_o \in R^3$

posición del vector desde el origen del sistema de coordenadas absoluto O_u al centroide del objeto O_o .

$w_o \in R^3$

vector velocidad angular del objeto.

$r_i \in R^3$

vector posición desde el origen del sistema de coordenadas absoluto al origen del sistema de coordenadas *i*-ésimo O_{hi} .

$w_i \in R^3$

vector velocidad angular

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_i \in \mathbb{R}^3$ | vector posición del sistema de coordenadas del objeto O_c al origen del sistema de coordenadas manual. |
| $f_i \in \mathbb{R}^3$ | fuerza aplicada al objeto |
| $n_i \in \mathbb{R}^3$ | momento aplicado al objeto |
| m | masa del objeto |
| M | tensor inercial del objeto |
| $I_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$ | matriz identidad $N \times N$ |
| $g \in \mathbb{R}^3$ | aceleración de la gravedad. |

La posición/orientación del objeto manipulado es fácilmente resuelto en el movimiento de cada brazo, manteniendo al objeto usando relaciones cinemáticas. Se usa la idea de vectores fuerza en el espacio de trabajo desarrollados por Uchiyama y Dauchez.

Las ecuaciones de movimiento de un objeto manipulado por un brazo robot son expresadas como sigue:

$$m \ddot{r}_o = F_o + mg \dots\dots\dots(14)$$

$$M \dot{w}_o + w_o \times (Mw_o) = N_o \dots\dots\dots(15)$$

donde F_o y N_o son las fuerzas y momentos resultantes de las fuerzas y momentos externos respectivamente, aplicados al objeto por el brazo robot.

$$F_o = \sum_{i=1}^n F_i \dots\dots\dots(16)$$

$$N_o = \sum_{i=1}^n N_i \dots\dots\dots(17)$$

F_i y N_i son las fuerzas y momentos equivalentes, respectivamente, aplicados a los objetos por el i -ésimo brazo en el origen del sistema de coordenadas del objeto, y:

$$F_i = f_i \dots\dots\dots(18)$$

$$N_i = n_i + p_i \times f_i \dots\dots\dots(19)$$

Reescribiendo (14) y (15) , tenemos:

$$L = K F \dots\dots\dots(20)$$

donde:

$$L = \begin{bmatrix} ml_3 & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}_0 \\ \dot{\omega}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -mg \\ \omega_0 \times (M\omega_0) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(21)$$

$$K = [I_6, \dots, I_6] \in R^{6n} \dots\dots\dots(22)$$

$$F = [F_1^T, N_1^T, F_2^T, N_2^T, \dots, F_n^T, N_n^T]^T \in R^{6n} \dots\dots\dots(23)$$

Para un movimiento dado de un objeto, se calcula L usando (21) y entonces se puede resolver (20) para hallar F :

$$F = K^+ L + (I_{6n} - K^+ K) \xi \dots\dots\dots(24)$$

donde K^+ es una matriz pseudoinversa de K y ξ es un vector arbitrario de $6n$ dimensiones. La segunda parte de (24) corresponde a la fuerza interna.

En general, la solución de (20) , esto es (24), no está determinada unicamente, sino que depende de como la carga es distribuida entre los brazos del robot. Bajo la asunción que el brazo robot tiene al menos la misma performance, se adopta una solución por la cual el brazo forma la carga igualmente en el origen del sistema de coordenadas del objeto:

$$F = \frac{1}{n} [I_6, \dots, I_6]^T L + \begin{bmatrix} I_6 & -\frac{1}{n-1} I_6 & \dots & -\frac{1}{n-1} I_6 \\ -\frac{1}{n-1} I_6 & I_6 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -\frac{1}{n-1} I_6 \\ -\frac{1}{n-1} I_6 & \dots & -\frac{1}{n-1} I_6 & I_6 \end{bmatrix} \xi' \dots \dots \dots (25)$$

donde ξ' es un vector arbitrario de $6n$ dimensiones. La solución para $n = 2$ es equivalente a la solución dada por Uchiyama y Dauchez y la ecuación (25) es una extensión de esta solución. El primer término del lado derecho de (25) da la porción de la carga y el segundo término da la distribución de la fuerza interna.

Para el caso $n \geq 3$, la distribución de la fuerza interna entre los brazos del robot en cooperación es muy complicada, y una solución práctica es como sigue:

$$F = \frac{1}{n} [I_6 \dots I_6]^T L + \left[-\frac{1}{n-1} I_6, \dots, -\frac{1}{n-1} I_6, I_6, -\frac{1}{n-1} I_6, \dots, -\frac{1}{n-1} I_6 \right]^T F_{int} \quad (26)$$

donde $F_{int} \in R^6$ es la fuerza interna aplicada al objeto por los brazos. Esta distribución estratégica significa que un brazo líder ejerce al objeto una fuerza igual a la fuerza interna deseada, y el otro brazo igualmente divide la fuerza que será aplicada al objeto para cancelar la fuerza, luego podemos seleccionar el brazo líder de acuerdo al entorno de trabajo, y la matriz de la distribución de fuerza interna viene a ser muy simple. Así, para un movimiento dado de un objeto y una fuerza interna dada, podemos calcular la fuerza/momento F por (26) o (25) o (24). La fuerza f_i y el momento n_i que serán ejercidas por cada brazo son calculadas de (18) y (19) como sigue:

$$f_i = F_i \dots\dots\dots (27)$$

$$n_i = N_i - p_i \times F_i \dots\dots\dots (28)$$

2.3.2. Dinámica del brazo robot

Por la simplicidad de discusión, se supone que cada brazo robot tiene seis grados de libertad. La dinámica del i-ésimo brazo se describe como sigue:

$$M_i(\theta_i) \ddot{\theta}_i + V_i \dot{\theta}_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + G_i(\theta_i) = \tau_i + \tau_{di} \dots\dots\dots (29)$$

donde:

| | |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| θ_i | vector de coordenadas de union de 6x1 |
| $M_i(\theta_i)$ | matriz de inercia de 6x6, la cual es simétrica y definida positiva. |
| V_i | matriz de coeficientes de fricción viscosa 6x6. |
| $C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)$ | coriolis y vector de fuerza centrípeta de 6x1. |
| $G_i(\theta_i)$ | vector del término gravedad de 6x1. |
| τ_i | vector de entrada consistente de fuerzas/torques de entrada aplicados a las uniones por actuadores 6x1 |
| τ_{di} | vector de entrada correspondiente a la fuerza/momento interactiva aplicada al brazo 6x1 |

Definimos al relación entre la posición/orientación del efector final del brazo robot en el sistema de coordenadas absoluto x_i y el vector de coordenadas de la unión θ_i como sigue:

$$x_i = T_i(\theta_i) \dots\dots\dots(30)$$

donde $x_i, T_i(\theta_i) \in R^6$.

Reescribiendo (29) y usando (30) tenemos:

$$M(\theta_i) J_i^{-1}(\theta_i) \{\ddot{x}_i - \dot{J}_i \dot{\theta}_i\} + V_i \theta_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + G_i(\theta_i) = \tau_i - J_i^T(\theta_i) \tilde{f}_i \quad (31)$$

donde:

$$J_i(\theta_i) \triangleq \frac{\partial T_i(\theta_i)}{\partial \theta_i} \in R^{6 \times 6} \quad (32)$$

y

$$\tilde{f}_i \triangleq [f_i^T, n_i^T]^T \quad (33)$$

$J_i(\theta_i)$ se asume no singular en el espacio de trabajo considerado, f_i es la fuerza y momento aplicado al objeto. Usando realimentación no lineal, la dinámica del brazo robot en el sistema de coordenadas absoluto es linealizado.

$$\tau = M(\theta) J_i^{-1}(\theta) \{u_i - \dot{J}_i \dot{\theta}\} + V_i \theta + C_i(\theta, \dot{\theta}) + G_i(\theta) + J_i^T(\theta) \tilde{f}_i \quad (34)$$

La linealización dinámica del brazo robot se expresa como sigue:

$$\ddot{x}_i = u_i \dots \dots \dots (35)$$

Debido a parámetros errados, etc., (34) no puede ser calculado precisamente, de modo que, el efecto de la imprecisión de la realimentación no lineal será disminuida por una elección adecuada de la ley de control lineal diseñada por (34).

2.3.3. Arquitectura de control

La arquitectura de control de movimiento coordinado de n brazos robots manipulando un objeto rígido es:

1. Como mantener un objeto por el brazo robot.
2. Como controlar la trayectoria del objeto, y

3. Como controlar la fuerza interna aplicada al objeto, son las mayores cuestiones a considerar por este sistema. Aquí se asume que cada brazo sostiene un objeto firmemente y ejerce una fuerza y momento sobre el objeto, esto es, se consideran la segunda y tercera cuestiones, bajo la asunción que pueden existir pequeños errores geométricos en el sistema robótico. El algoritmo de control para cada brazo está basado en el concepto del modelo interno virtual.

2.3.3.1. Concepto del modelo interno virtual

En el sistema ordinario de servo control robótico, el movimiento de un brazo robot es controlado tal como se sigue una señal de referencia tan preciso como sea posible. La señal de referencia está dada por el sistema supervisor o comandada por un operador del servo sistema, el cual no modifica la señal de referencia aún si ocurren interacciones peligrosas con su entorno de trabajo.

En general, un robot no puede considerarse aislado de su entorno de trabajo, y una manera para controlarlo es usando sensores realimentados u otra información acerca del entorno de trabajo.

En suma, para salvar estos problemas, la función de control de interacciones entre un robot y su entorno de trabajo, el cual debe ser hecho con un mínimo retardo de tiempo y con la dinámica deseada, será construido en un servo sistema, en tal sistema, una señal de referencia es modificada en el servo sistema de acuerdo a la información monitoreada del entorno por sensores, y el robot sigue la señal modificada, la cual es la "referencia virtual" del robot. En suma para controlar las interacciones entre un robot y su entorno de trabajo, se especificará también la dinámica de interacciones, esto es, el comportamiento dinámico del robot hacia la información sensada, y esto se refiere al modelo virtual o modelo interno virtual.

En la Fig. 2.10 se muestra el concepto del método del problema de control de interacciones entre un robot y su entorno. La información monitoreada

acerca del entorno de trabajo es realimentada al modelo interno virtual así como una señal de referencia, este modelo genera una referencia virtual para un robot con especificaciones dinámicas.

2.3.3.2. Diseño de la arquitectura de control

En la Fig.2.11 se muestra la arquitectura propuesta. Usando el resultado de 2.3.1, resolvemos el movimiento del objeto en la trayectoria de cada brazo y la fuerza/momento que será aplicada al objeto por cada brazo. Dado $x_{di} \in \mathbb{R}^6$ se resuelve la trayectoria de referencia y f_{di} es la referencia fuerza/momento resuelta para el i-ésimo brazo. Se genera f_{di} en una manera de alimentación hacia adelante en (34) como sigue:

$$\tau(\theta) = M(\theta) J_i^{-1}(\theta) \{u_i - \dot{J}_i \dot{\theta}\} + V_i \theta + C_i(\theta, \dot{\theta}) + G_i(\theta) + J_i^T(\theta) \bar{f}_{di} \quad (36)$$

Para controlar la trayectoria de cada brazo en un camino no conflictivo se introduce el siguiente modelo dinámico:

$$M_{mi} \Delta \ddot{x}_i + D_{mi} \Delta \dot{x}_i + K_{mi} \Delta x_i = f_i - \bar{f}_{di} \dots \dots \dots (37)$$

donde:

$$\Delta x_i = x_{mi} - x_{di} \dots \dots \dots (38)$$

y f_i es la fuerza/momento actual detectada por el sensor de fuerza conectado al extremo del brazo, x_{mi} es la trayectoria de referencia modificada por el i-ésimo brazo, $M_{mi} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $D_{mi} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ y $K_{mi} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ son matrices definidas positivas.

La ecuación (37) implementa una especie de impedancia alrededor de la fuerza/momento f_{di} a fin de que disminuyan los efectos de errores geométricos en el sistema robótico. Podemos conservar la fuerza interna alrededor de su valor deseado bajo incertidumbre geométrica del sistema robótico, donde se tiene que:

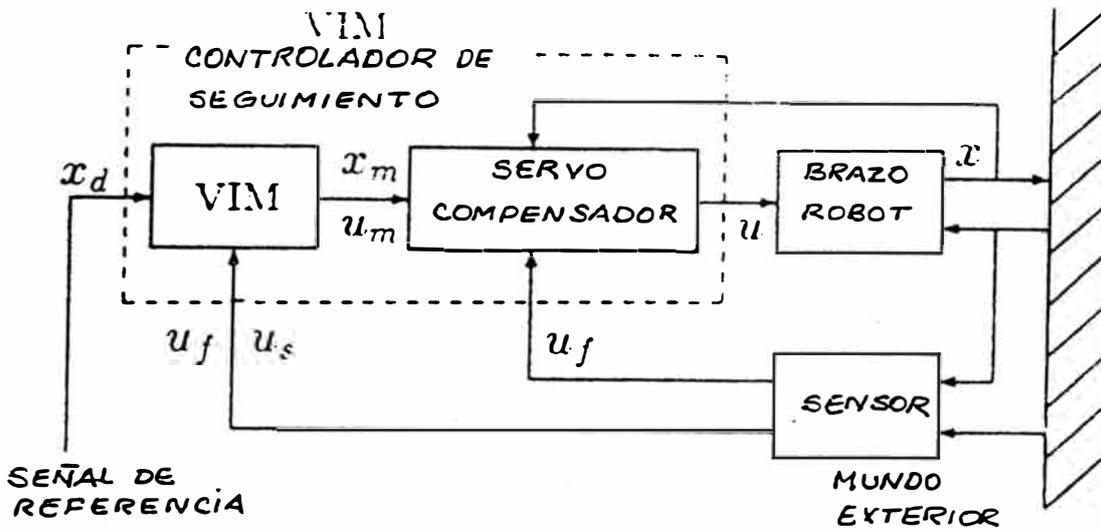


FIG. 2.10 CONCEPTO DE MODELO INTERNO VIRTUAL

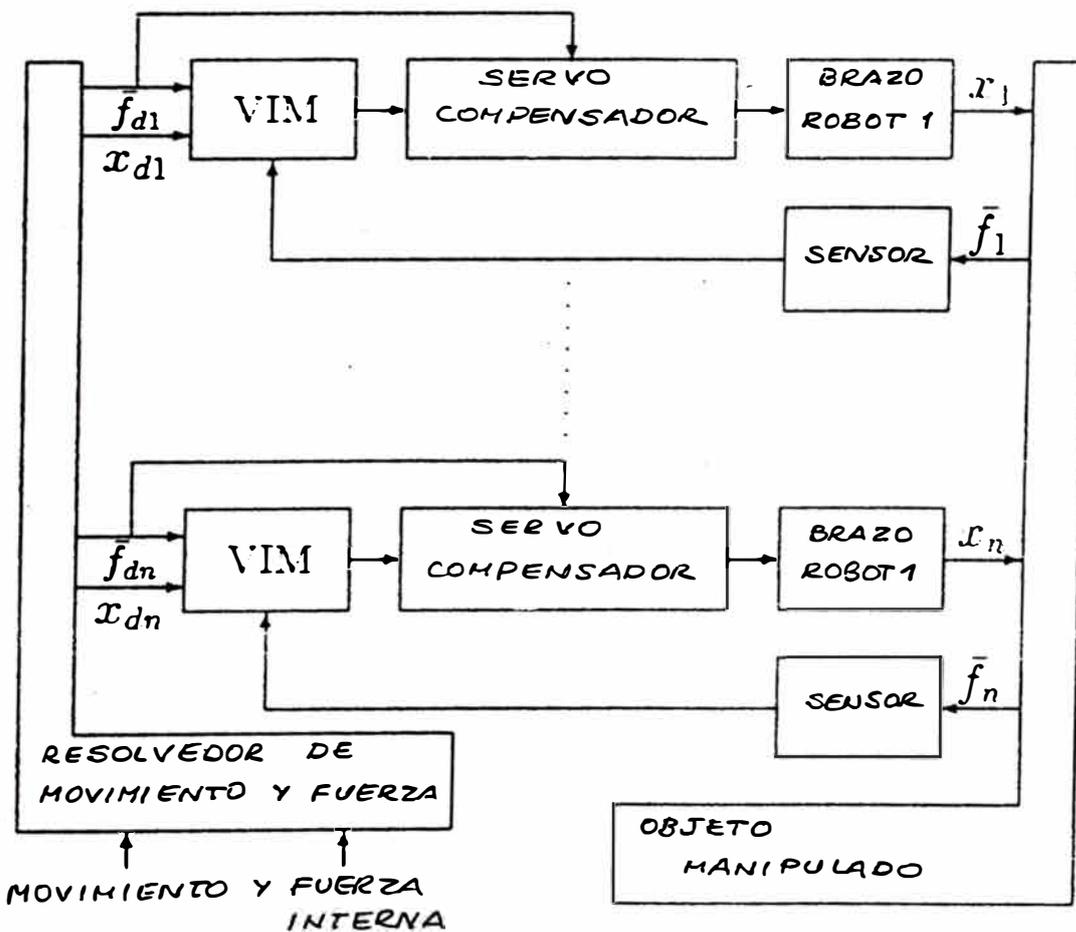


FIG. 2.11 ARQUITECTURA DE CONTROL PROPUESTA

$$\bar{f}_i = \bar{f}_{di} \dots\dots\dots (39)$$

y

$$\ddot{x}_{mi} = \ddot{x}_{di} \dots\dots\dots (40)$$

que se mantienen cuando no existe error geométrico.

Reescribiendo (37) tenemos:

$$x_{mi} = u_{mi} \dots\dots\dots (41)$$

donde:

$$u_{mi} = \ddot{x}_{di} - M_{mi}^{-1} D_{mi} (\dot{x}_{mi} - \dot{x}_{di}) - K_{mi} (x_{mi} - x_{di}) + M_{mi}^{-1} (\bar{f}_i - \bar{f}_{di})$$

la ecuación (41) es el modelo interno virtual del i-ésimo brazo, y x_{mi} es la referencia virtual del i-ésimo brazo.

2.3.3.3 Algoritmo de control

De (35) y (41) se tiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_6 \end{bmatrix} u_i$$

donde :

$$e_i \cong x_{mi} - x_i \dots\dots\dots (44)$$

y

$$u_i \cong u_{mi} - u_i \dots\dots\dots (45)$$

La trayectoria del problema de seguimiento es formulada como la estabilización del sistema en (43), y desde que el sistema puede ser considerado que tiene algunos parámetros errados y disturbios por compensación de realimentación no lineal incorrecta (34), esto es necesario para diseñar un algoritmo de control robusto en orden para disminuir sus efectos. Para eliminar el error de estado estable en los puntos de parada y los efectos de constantes disturbios, se diseña un controlador robusto en el modelo del servo controlador. Una ley de control se da por:

$$\hat{u}_i = K_{1i} e_i + K_{2i} \dot{e}_i + K_{3i} \int_0^t e_i(t') dt'$$

donde K_{1i} , K_{2i} , K_{3i} son matrices definidas negativas. La entrada de control resultante u_i se da como:

$$u_i = u_{mi} - \hat{u}_i \dots \dots \dots (46)$$

La entrada actual del i-ésimo brazo se calcula por (36) y (46). Se se asume que la ruptura de los objetos ocurre ligeramente, el cambio de la fuerza/momento aplicada al objeto f_i es representada por una función escalón. La referencia virtual x_{mi} muestra la respuesta del sistema estable de segundo orden a la entrada de la función escalón y es guardada, desde que la trayectoria del brazo actual x_i es guardada. Debe notarse que la trayectoria actual x_i converge a la constante:

$$x_{di} + (f_i - f_{di}) / K_{mi}$$

cuando la trayectoria de referencia y la fuerza de referencia son constantes, en este caso, el estado del sistema robótico es mantenido contra la rotura del objeto.

CAPITULO III

MODELOS AUTOMATIZADOS DE APLICACION

3.1 Sistema de navegación visual para vehículos terrestres

En esta parte se hará una descripción de la organización de un sistema de navegación visual de caminos y redes de caminos. El objetivo es el de dotar a un vehículo robot móvil con la inteligencia requerida para sensor y percibir las partes necesarias cercanas para pedir soporte navegacional. El vehículo mantiene movimiento continuo pero alternativamente “mirando delante” y entonces “conduciendo a ciegas” por una corta distancia antes de tomar otra vista. Mientras se mueve ciegamente, acepta imágenes monoculares y las procesa para extraer características, las cuales son luego interpretadas en tres dimensiones por una combinación de contorno y forma y razonamiento geométrico, que provee los datos requeridos para formar la representación de un objeto centrado en la forma de un mapa local. Este mapa es usado para navegación y para enfocar la atención en partes seleccionadas del campo visual, cuando el vehículo continúa el movimiento, aceptando nuevas imágenes para procesarlas.

La construcción de la arquitectura de un sistema modular es atractiva por una variedad de razones, los módulos individuales pueden poseer responsabilidades bien definidas y consistir de varias capacidades de relación computacional, ya que el comportamiento que el vehículo mismo exhiba reflejará el “flujo de control” a través de los módulos del sistema. Esta descomposición en módulos también apunta a la importancia de las interfaces que enlazan los módulos. La modularidad también abre la puerta para distribuir procesamiento paralelo, con varios módulos posiblemente corriendo en hardware dedicado.

La tarea navegacional es categorizada en tres tipos (o niveles) que actúan en diferentes escalas, y los tres contribuyen al acto general de planificar el camino para el vehiculo, también los tres tipos de tareas requieren su propia visión y capacidad de cómputo. Estos niveles de navegación corresponden a la descomposición y representación de espacio a través del cual el vehiculo debe navegar, estos niveles se denotarán por: navegación de rango largo, medio y corto, cada uno con un espacio en diferente escala y para diferentes propósitos. Así, el rango largo trata con la descomposición del espacio en un conjunto de regiones contiguas, con cada región con características uniformes tales como visibilidad de las marcas de terreno y facilidad de travesía. El rango intermedio es responsable para seleccionar corredores del espacio libre entre regiones. Finalmente, el rango corto debe determinar vías de pase seguro del espacio libre, evitando obstáculos durante el trayecto.

3.1.1 Multiescala de navegación

Tipicamente, es responsabilidad del módulo de navegación determinar la posición actual del vehiculo, y planificar un camino a través del entorno desde la posición actual de ubicación a la posición del objetivo. Para ejecutar sus funciones, el navegador debe tener disponible una variedad de capacidad de cómputo así como fuentes visuales (provistas por el módulo de visión dentro del sistema). Este problema se descompone en tres niveles de navegación que actúan en diferentes escalas espaciales: rango de navegación largo, intermedio y corto. Los caminos generados están en la forma de una secuencia de regiones (como rango largo), una mira direccional o corredor de espacio libre que conecta la región actual con la siguiente región en la secuencia (como rango intermedio) y finalmente una vía de paso seguro a través de la cual se selecciona el corredor mientras se están evitando obstáculos (como rango corto).

3.1.2 Arquitectura del sistema

En la Fig. 3.1 se muestra la implementación del sistema modular. Hay una variedad de razones para construir un sistema modular, una de las cuales se mencionó anteriormente, hay una clara distinción entre la capacidad de cómputo que reside dentro de los módulos individuales y el flujo de control sobre las interfaces entre los módulos, los cuales permiten al vehículo exhibir algún comportamiento.

3.1.2.1 Bootstrap vs alimentación delantera

La arquitectura de la Fig 3.1 consiste de un sistema de visión alargada con módulos para planear, navegar y pilotear. El sistema de visión se descompone en módulos que soportan niveles de visión bajo, intermedio y alto. El sistema de visión opera de dos modos, bootstrap y alimentación delantera, esta distinción es posible debido a que el sistema puede explotar un foco de atención en la porción del campo visual más importante. El modo bootstrap es empleado cuando el sistema de visión debe establecer su primera vista en un objeto, por ejemplo debe hallarlo en el campo visual. Esto muchas ocasiones requiere procesar al imagen entera (si la posición del vehículo se conoce y se provee el mapa de datos detallado, el sistema puede saltar el modo bootstrap y usar el mapa para enfocar la atención). Una vez que el objeto es localizado, el sistema de visión puede predecir (con alguna exactitud) la ubicación del objeto en la siguiente vista, y así procesamientos futuros para una pequeña porción del campo visual. El sistema es entonces operado en el modo de alimentación delantera. Esta especie de procesamiento, en el cual el mantenimiento del foco de atención es particularmente importante cuando las fuentes computacionales son limitadas, lo cual ocurre en la mayoría de los casos. De hecho, este es el modo de operación de alimentación delantera que el vehículo puede llevar a cabo en movimiento continuo sobre un camino libre de obstáculos. Aceptando una imagen por procesamiento de alimentación delantera el

vehículo puede moverse ciegamente mientras está derivando un nuevo modelo tridimensional del camino a partir de la imagen, durante este viaje, el vehículo no hace cálculos de su posición relativa al modelo tridimensional derivado previamente. Dependiendo de la exactitud del sistema, uno puede extender la distancia de viaje ciego y llevar el vehículo a mayor velocidad, de modo que, esto no será apropiado si los obstáculos pueden moverse en el camino del vehículo durante el tiempo de viaje ciego.

3.1.2.2 Responsabilidad de los módulos

Los módulos de visión del sistema soportan visión de bajo nivel (procesamiento de imágenes), nivel intermedio (geometría) y alto nivel (reconocimiento base). Estos módulos son coordinados por un módulo de visión ejecutivo, el cual tiene acceso a representación tridimensional, predicción de escenas y sensor de módulos de control. La visión ejecutiva también soporta interfaces para los módulos de planeamiento y navegación. El módulo piloto se comunica sólo con el de navegación, estas capacidades funcionales de los módulos son listadas dentro de cada módulo en el diagrama.

El sistema de visión como un todo es responsable de percibir objetos de interés (como caminos y marcas de terreno) y representarlos en una referencia de "objeto centrado". El módulo de procesamiento de imagen es responsable de extraer representaciones simbólicas de las imágenes individuales, este dominio simbólico de imágenes corresponde a eventos significativos en la señal de datos; hay características generales que describen imágenes (tales como orillas, líneas y curvas).

La extracción de símbolos puede ser ejecutada en una imagen entera o dentro de una ventana especificada, y el módulo llamado base de reconocimiento visual tiene varias responsabilidades. Dado el dominio simbólico de imagen por el módulo de procesamiento de imágenes, el módulo de reconocimiento base establece el agrupamiento significativo de

estos símbolos (por ejemplo trazos de líneas), estos agrupamientos son globales, correspondiendo a organizaciones espaciales sobre grandes partes de la imagen, en contraste a los símbolos mismos los cuales son típicamente grupos locales de eventos. La base de reconocimiento visual es también responsable de establecer grupos significativos de representaciones tridimensionales provistos por el módulo de geometría.

La visión ejecutiva es el corazón de la visión del sistema, mantiene el control de flujo a través de esta parte del sistema, encontrando el objetivo (tal como hallar el camino o marcas de terreno o hallar obstáculos) provisto por el planeador y navegador. Esto se ejecuta disparando el modo de operación (bootstrap o alimentación delantera). La visión ejecutiva es agregada por varios submódulos adicionales los cuales también se muestran en la Fig 3.1.

Una vez que el modelo tridimensional de la escena ha sido establecido en el sistema de coordenadas de vista centrada, es convertido a una representación de objeto centrado por el módulo de representación tridimensional. Esta representación es más compacta que una descripción de vista centrada, y corresponde a un modelo organizado del mundo alrededor del componente estático de la escena, lo cual en realidad domina la escena. En el caso de caminos, esta representación pasa al módulo navegador para planificar el camino, esta representación tridimensional también es usada por el predictor de escena, para enfocar la atención en pequeñas áreas del campo visual en el cual los objetos importantes son ubicados. Finalmente, la visión ejecutiva puede controlar el apuntado de la cámara por medio de un sensor de control

3.1.2.3 Seguidor de camino

Accesando a la capacidad de cómputo, la cual reside en los módulos en un orden particular, el sistema puede exhibir cierto comportamiento, así en un sistema modular, el control de flujo a través del sistema juega un rol

central. En la Fig. 3.1 se indica el control de flujo entre módulos los cuales soportan el pedido del seguidor de camino. Comenzando con el vehículo en alto y algún camino en el campo visual, el planeador especifica el objetivo a alcanzar en algún punto o distancia del camino. Esta ubicación del objetivo se pasa al navegador el cual debe especificar el objetivo visual de "hallar el camino en el campo de vista", pasando a la visión ejecutiva.

El sistema de visión debe primero hallar el camino y así el modo bootstrap de procesamiento se selecciona, y una imagen es aceptada en el módulo de procesamiento de imágenes. El ejecutivo también selecciona cual procedimiento de proceso de imagen será utilizado, actualmente se usa la característica de extracción lineal. La característica lineal domina la escena, comprime símbolos bidimensionales pasados al ejecutivo a la forma de puntos terminales de cada característica; estos símbolos son entonces pasados a la base de reconocimiento donde ellos son agrupados en líneas. Un camino con vueltas o cambios de pendiente en el campo visual darán subidas de varias líneas en la misma imagen. Las líneas son entonces retornadas al ejecutivo donde ellas son interpretadas una a la vez desde el comienzo al final de la imagen (correspondiendo a próximo o lejano). Cada línea es pasada al módulo geométrico donde se le da la interpretación de forma tridimensional en la forma de líneas paralelas o un camino de superficie plana. Esto es esencialmente "forma desde contorno", esto es capaz de recuperar camino geométrico sobre terreno. Así, las líneas bidimensionales son convertidas a paralelas tridimensionales las cuales son relevadas a la base de conocimiento via el ejecutivo. Como cada conjunto de paralelas arriba a la base de conocimiento, el conocimiento acerca de las estructuras del camino se usa para decidir si las paralelas y superficies correspondientes parchan las marcas sensadas, sino, se consideran grupos alternativos de líneas. Cada trazo sucesivo es interpretado como paralelas, y chequeado para su consistencia con paralelas aceptadas, en relación con la descripción del camino construido a partir de la vista centrada tridimensional.

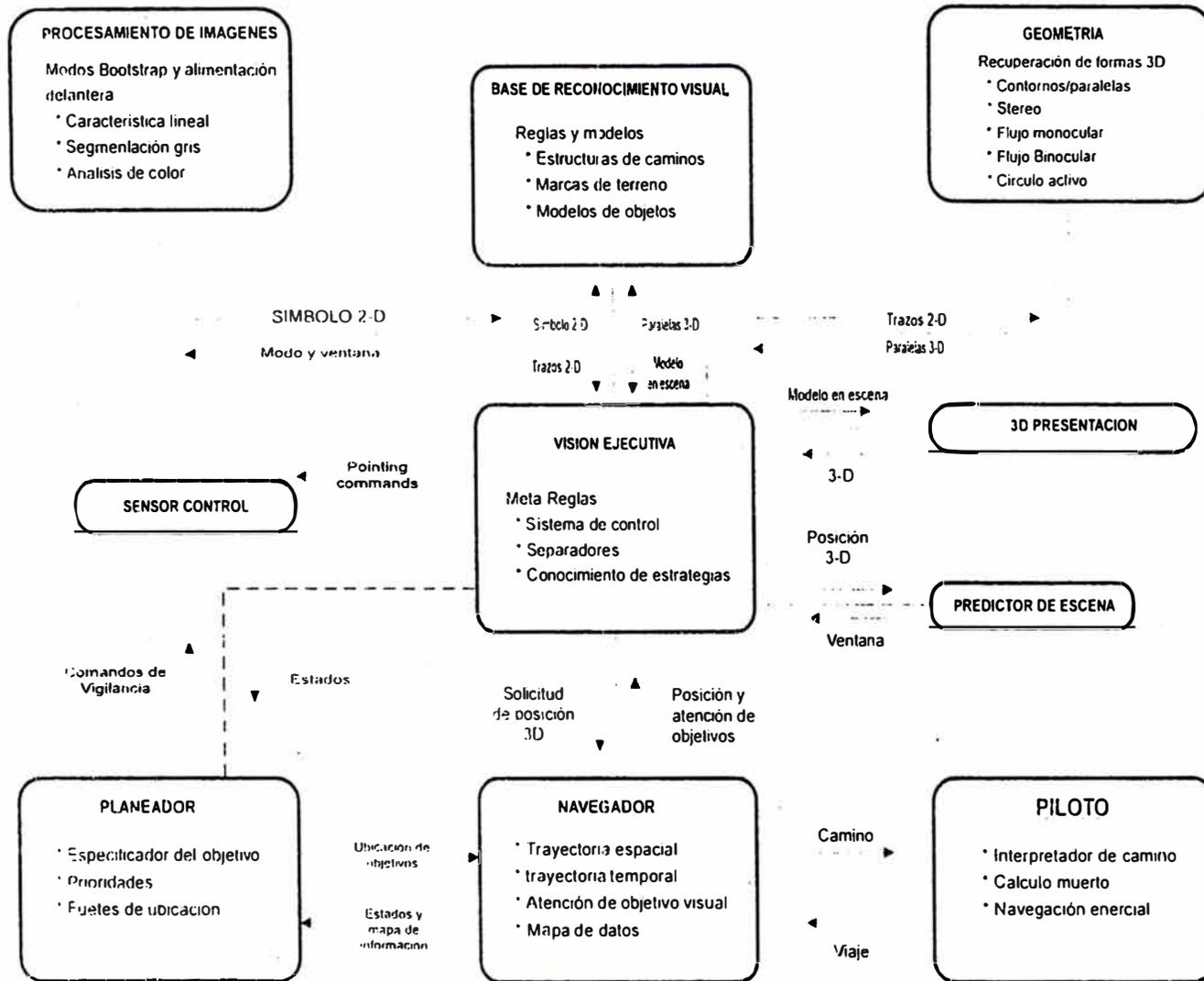


FIG. 3.1 ARQUITECTURA DE SISTEMA MODULAR PARA NAVEGACION VISUAL

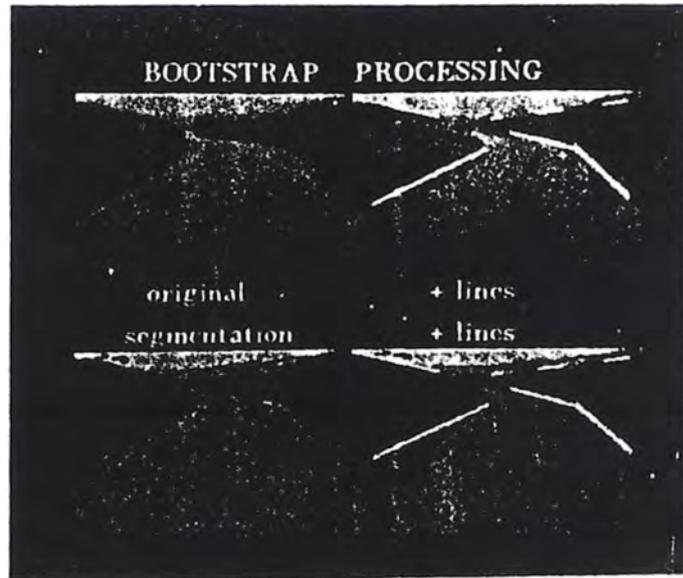


FIG. 3.2 PROCEDIMIENTO DE IMAGEN EN MODO BOOTSTRAP

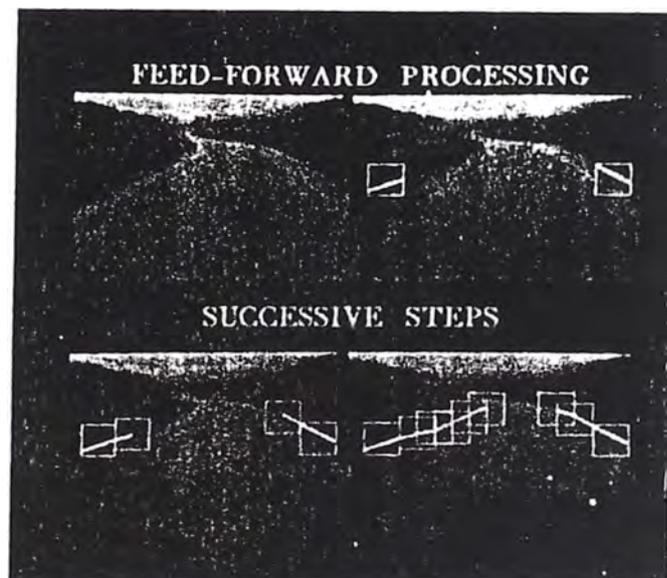


FIG. 3.3 EXTRACCION DE LA CARACTERISTICA LINEAL EN EL MODO DE ALIMENTACION DELANTERA

Las partes del camino son marcadas como "fronteras, líneas centradas, rutas marcadas o bordes de fronteras". Esto es, el objeto "camino" se reconoce por medio de atributos en el mundo, particularmente sus relaciones espaciales. Este modelo en escena es entonces pasado al módulo de representación tridimensional el cual convierte el modelo de vista centrada del camino (consistente de una secuencia de líneas paralelas en el espacio relativo a la cámara) en una representación compacta del objeto centrado en el cual cada camino plano es descrito relativo al camino previo, y el ancho del camino y el número de bordes se especifica. El vehículo es entonces ubicado relativo al primer camino plano. Antes pasa esta representación al navegador (el vehículo quieto no se mueve), el ejecutivo usa el predictor de escena para seleccionar pequeñas ventanas próximas al fondo del campo visual dentro del cual las fronteras derecha e izquierda del camino son ubicadas. El ejecutivo entonces utiliza el procesamiento de imagen local del modo de alimentación directa para refinar las ubicaciones de las fronteras del camino. Una vez que las fronteras del camino han sido establecidas, el sistema prueba la continuidad del camino a través del dominio de la imagen, chequeando sus interpretaciones tridimensionales, y esta representación pasa al navegador. El navegador planea entonces un camino por la ruta y pasa segmentos de este al piloto, el piloto descompone el camino en comandos de movimiento, y el vehículo empieza a moverse. Periódicamente el piloto retorna la distancia y encabezamiento actual viajado al navegador, y este informa a la visión ejecutiva de la posición y el ejecutivo pregunta que nueva imagen se toma. El ejecutivo también pasa esta posición al predictor de escena, el cual utilizando la representación tridimensional previa, determina la apariencia de los bordes del camino desde este nuevo lugar estratégico y selecciona nuevas ventanas próximas al fondo de la nueva imagen dentro de la cual los bordes del camino son hallados. La nueva imagen es entonces procesada en el modo de alimentación delantera y el sistema continúa de esta forma hasta que se le ordene parar. Luego el

vehículo viaja sobre segmentos de camino de alrededor de 10m de longitud usando un mapa creado desde una imagen tomada 10m atrás del segmento, manteniendo un movimiento continuo.

3.1.3 Capacidad computacional de los módulos

Habiendo visto la naturaleza de las responsabilidades asignadas a los módulos individuales, y como están enlazados por un control de flujo para soportar las solicitudes del seguidor de camino, ahora vamos a ver al cálculo específico que toma lugar dentro de los módulos. La naturaleza de estos cálculos se sugiere por los puntos listados dentro de las cajas de módulos de la Fig.3.1

3.1.3.1 Base de reconocimiento visual

Este módulo implementa dos formas de visión separadas tomando grupos significativos de símbolos derivados de una imagen y chequeando la consistencia de la forma recuperada tridimensional con modelos genéricos de objetos (ejemplo caminos) . Los trazos son determinados por grupos espaciales de intersecciones entre pares de líneas para sugerir los puntos que desaparecen. Se adopta un conjunto de puntos que desaparecen cuando se agrupa líneas desde el comienzo al final de una imagen. En el contexto del camino seguido, estos grupos representan hipótesis acerca de los bordes y marcas del camino, y la geometría misma del camino cuando más de un grupo se halla. Los resultados bootstrap de la Fig. 3.2 son agrupados en dos trazos (la línea de frontera del camino izquierdo se parte en dos) delineando aproximadamente la curva en el camino; las líneas horizontales son descartadas ya que no son consistentes con los trazos convergentes.

El resultado de alimentación delantera mostrada en la Fig. 3.3 produce una secuencia de muchos trazos (los bordes del camino son marcados a partir de la predicción de sus posiciones de la base de la imagen hacia arriba). Estos

trazos más aproximados reflejan la geometría del camino y la estructura del terreno.

Una mayor extensión de este proceso de razonamiento que debe ser considerado, es la habilidad para combinar la independencia de las descripciones simbólicas extraídas por el módulo de procesamiento de imágenes.

El complemento natural de las descripciones basadas en fronteras y regiones ilustradas en el cuadrante derecho inferior de la Fig. 3.2 es claro.. Por ejemplo grupos de líneas en trazos pueden usarse para enfocar la atención en los segmentos limitados por el trazo. De hecho, la consistencia del trazo con segmentos agrupados puede usarse para seleccionar parámetros para el proceso de segmentación (que pueden ser parámetros de sensado), y los resultados de la segmentación pueden usarse para construir un modelo de camino que cubra una mayor distancia. Esta clase de información puede ser muy útil para rutas planeadas.

3.1.3.2 Geometría

El módulo de geometría convierte los grupos simbólicos en dominio de imagen a una descripción de vista centrada tridimensional de objetos en la escena. Actualmente el sistema utiliza varios métodos para recuperar formas desde una imagen monocular; y estas son esencialmente "formas del contorno" . El primer método asume que la tierra es plana y complica la proyección simple de la imagen de la frontera del camino en el plano de tierra (determinado desde el sistema de navegación terrestre del vehículo).

Un segundo método de recuperación de formas, invierte la perspectiva de la imagen procesada asumiendo los siguientes tres modelos:

1. Los trazos en el dominio de la imagen corresponden a planos paralelos en el mundo.
2. La continuidad en el dominio de la imagen implica continuidad en el mundo.

3. Las cámaras se sitúan sobre el primer plano de tierra visible (al fondo de la imagen).

La reconstrucción tridimensional entonces caracterizará un camino de ancho constante, con vueltas y cambios de pendiente y orillas.

Un ejemplo del método se muestra en las Figs. 3.4 y 3.5, la primera ilustra un conjunto de características lineales que se imaginan extraídas de una secuencia de cuatro imágenes tomadas cuando el vehículo se mueve (las posiciones correspondientes se marcan con "a, b, c, d" en la Fig.3.5). Cada trazo será interpretado como líneas paralelas de un trozo de superficie plana, y así una reconstrucción del camino se muestra en la Fig. 3.5. Los puntos de la imagen donde se encuentran actualmente los segmentos de línea son llamados "puntos de continuidad" marcados como "c" en la Fig.3.4(a). Los puntos marcados como "v" en la Fig.3.4(a) ilustran "puntos desaparecidos" determinados por la intersección de características lineales. Los puntos donde el primer trazo de líneas deja el fondo del campo visual en la primera imagen (tomado cuando el vehículo arranca) son determinados "puntos de inicialización", marcados como "in" en la Fig. 3.4(a). Adoptamos un sistema coordinado de vista centrado en el cual el origen está en el centro de los lentes de la cámara y el eje Z apunta a lo largo del centro del campo visual. El eje X se escoge horizontal, apuntando a la izquierda del visor. El eje Y estará entonces vertical si la cámara no se ladea. Consideremos una imagen en coordenadas escaladas a la longitud de unidad focal, así:

$$x = X/Z \quad ; \quad y = Y/Z \dots\dots\dots(1)$$

La i-ésima superficie plana es entonces descrita en coordenadas tridimensionales por:

$$A_i X + B_i Y + C_i Z = 1 \dots\dots\dots(2)$$

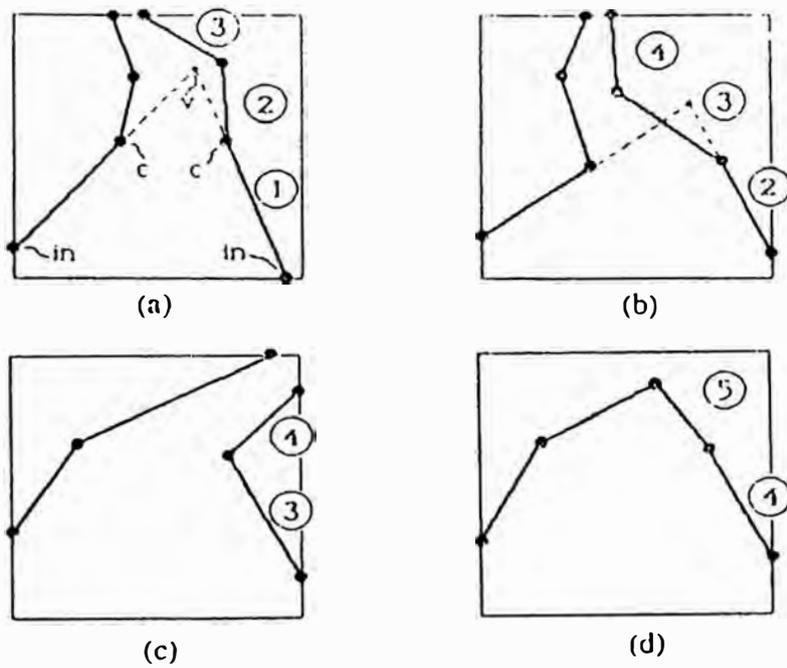


FIG. 3.4 SECUENCIA SIMULADA DE CARACTERISTICAS LINEALES DETECTADAS DESDE 4 POSICIONES CUANDO UN VEHICULO SE MUEVE

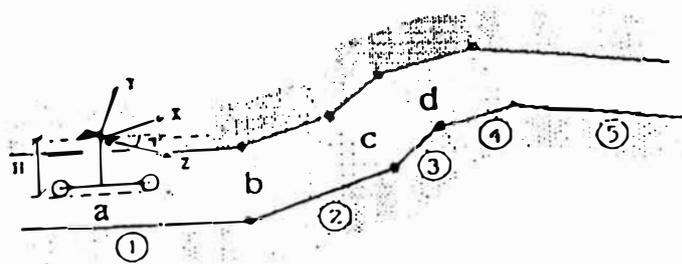


FIG. 3.5 RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRIA DEL CAMINO SOBRE EL TERRENO

y así en coordenadas imagen por:

$$A_i X + B_i Y + C_i Z = 1/Z \dots\dots\dots(3)$$

Se asume que la cámara se sitúa a una altura conocida H sobre la tierra y tiene una inclinación conocida τ con respecto a la horizontal. Entonces, prescindiendo del ángulo (u orientación del vehículo con respecto al camino) , los coeficientes del primer plano de tierra se determinan por:

$$A_1 \equiv 0 \quad , \quad B_1 \equiv -(\cos \tau)/H \quad , \quad C_1 \equiv (\sin \tau)/H \dots\dots\dots(4)$$

La profundidad a los puntos de inicialización pueden ser determinados por:

$$1/Z_{i;n} = 1/H (\sin \tau - y_{i;n} \cos \tau) \dots\dots\dots(5)$$

Notar que desde que se asume conocido el plano de tierra inicial, los puntos desaparecidos del primer trazo estarán en una línea desaparecida para el plano. Para determinar la geometría del camino en la distancia, es necesario resolver para los coeficientes de cada camino plano sucesivo, y entonces obtener la profundidad para puntos en la frontera del camino. Los coeficientes son determinados por la continuidad asumida de las fronteras derecha e izquierda del camino (cuando hay continuidad en la imagen). Partiendo del primer camino plano, podemos fácilmente determinar la profundidad del primer punto de continuidad al final del primer camino plano. Cada lado del camino genera una condición de continuidad, esto es verdadero en general entre algunos caminos planos sucesivos, y esta condición se expresa por:

$$A_i x_{c_i} + B_i y_{c_i} + C_i = 1/Z_{i-1} c_i \dots\dots\dots(6)$$

$$A_i x_{cr} + B_i y_{cr} + C_i = 1/Z_i - 1/c_r \dots\dots\dots(7)$$

La tercera condición expresa el hecho de que los puntos que desaparecen de un trazo representan la proyección de un punto al infinito (por ej. $Z \rightarrow \infty$)

$$A_i x_{vi} + B_i y_{vi} + C_i = 0 \dots\dots\dots(8)$$

Las ecuaciones (6) a (8) forman un sistema de tres ecuaciones lineales con tres incógnitas como coeficientes que describen el i-ésimo camino plano. Así, partiendo del primer plano de tierra, uno trabaja sobre el vehículo, construyendo un modelo de la topografía del terreno en el sistema coordinado de vista centrada.

El módulo geométrico puede utilizar este método de reconstrucción del camino topográfico. Así como cada camino plano es recuperado, las características lineales son divididas en segmentos los cuales son opuestas físicamente a uno y otro lado del camino tridimensional. Esto simplifica el chequeo simétrico impuesto por la base de reconocimiento visual siguiendo la recuperación de formas y es también requerido por el predictor, claramente, este método de recuperación de formas esta estrechamente acoplado a la hipótesis de que las marcas de líneas corresponden a bordes y marcas del camino, de modo que se encontraran algunos problemas con este algoritmo de recuperación de formas. Sobre curvas en caminos, por ejemplo, los segmentos lineales extraídos por la imagen procesada no corresponden a segmentos paralelos de camino, y el modelo de camino construido es incorrecto.

Visión ejecutiva: Este módulo no ejecuta realmente ningún cálculo todavía. Mantiene el control de flujo a través del sistema para exhibir un comportamiento, tal como el camino seguido. Como los contenidos del conocimiento base son expandidos para incorporar otros modelos de objetos, la visión ejecutiva tomará las decisiones acerca de que escenas

características buscar, que sensores usar en estas búsquedas, etc. Una vez que los módulos del sistema son mapeados para nodos individuales de un multiprocesador, la visión ejecutiva requerirá pasar los mensajes entre módulos ya que los cálculos son asíncronos.

3.1.3.3 Representación tridimensional

Este módulo convierte la representación de visión centrada tridimensional de la escena del camino en una descripción de objeto centrado. La descripción está en la forma de un archivo, el cual lista un conjunto de atributos del camino en cada "marca de camino" puesta. Las marcas de camino son colocadas por este módulo a lo largo de la línea central del modelo de camino reconstruido, al comienzo de cada nuevo recorrido plano. Las marcas de camino también son colocadas en intersecciones, una vez que el sistema aprende a reconocerlas. La Fig. 3.6 ilustra esta representación en términos de marcas de camino, donde para cada una el archivo contiene la distancia de la marca previa y el ángulo de Euler, el cual describe los tres ángulos de rotación del cuerpo rígido de un sistema de coordenadas local vinculado al camino. Así cada segmento de camino es descrito relativo al segmento de camino previo. Esto es importante por varias razones, como el vehículo se mueve, explora el objeto llamado camino, experimentando cambios en la geometría del camino entre segmentos de este. La geometría absoluta de un segmento de camino es irrelevante (y la geometría relativa a una vista particular es más despreciable). Más aún, los errores en la geometría del camino debidos al proceso visual serán confinados a errores locales, mas bien que estan compuestos sobre la distancia completa viajada. En suma a la distancia y ángulos de Euler relativos a las marcas de camino previas, el ancho de camino, número de rutas y presencia de bordes, son codificados en representación tridimensional. Finalmente la ubicación de obstáculos y el vehículo mismo, relativo a la marca de camino más próxima, están incluidas en la

representación creada. La conversión de coordenadas de vista central a la de objeto centrado (ángulos de Euler) se ilustran en la Fig. 3.7. Aquí los dos caminos planos son representados por coordenadas locales conectados al camino en los puntos A y B. Los vectores unitarios n , l y t se alinean con la dirección normal local, longitudinal y transversal y cada uno de estos puntos son fácilmente obtenidos de los resultados de la visión centrada provistos por el módulo geométrico. Los dos sistemas locales se relacionan por una rotación de cuerpo rígido, especificado por los tres ángulos de Euler θ , ϕ y ψ que corresponden a las tres rotaciones mostradas en la figura. La secuencia de transformaciones que se muestra en la Fig. 3.7 es:

1. Una rotación alrededor del eje normal n un ángulo de giro θ .
2. Una rotación alrededor del nuevo eje transversal t un ángulo de pendiente ϕ .
3. Una rotación alrededor del eje longitudinal final un ángulo de cuesta ψ .

Cada rotación es una rotación bidimensional alrededor de un eje diferente, y ellos están dados por las matrices "giro, pendiente y cuesta" $T(\theta)$, $S(\phi)$, $B(\psi)$:

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \text{sen } \phi \\ 0 & -\text{sen } \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$B(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \text{sen } \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}$$

La red de rotación rígida es el producto de estas tres matrices:

$$R(\theta, \phi, \psi) = B(\psi)S(\phi)T(\theta), \text{ obteniendo:}$$

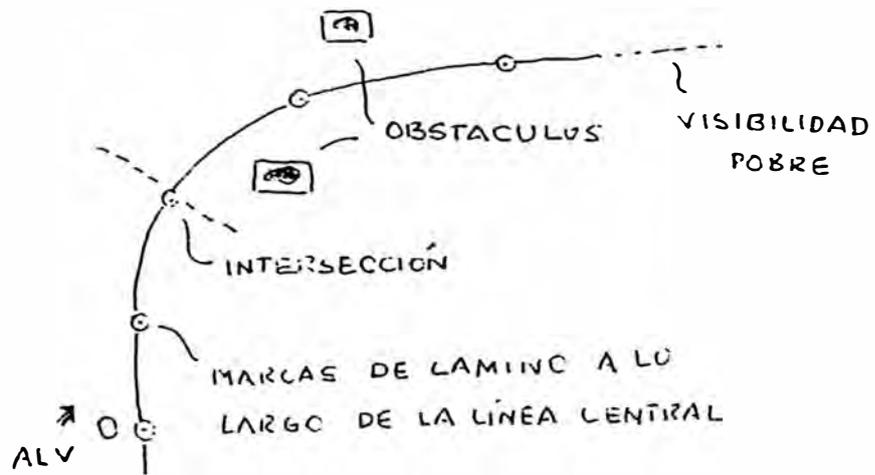


FIG. 3.6 REPRESENTACION TRIDIMENSIONAL DE REFERENCIA DE UN OBJETO CENTRADO EN EL CAMINO

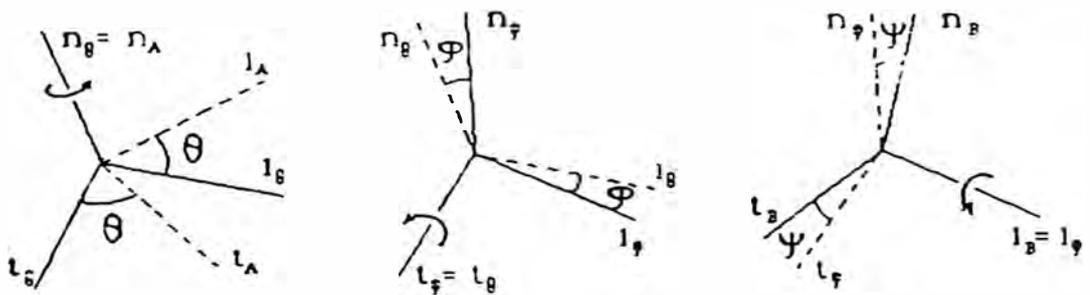
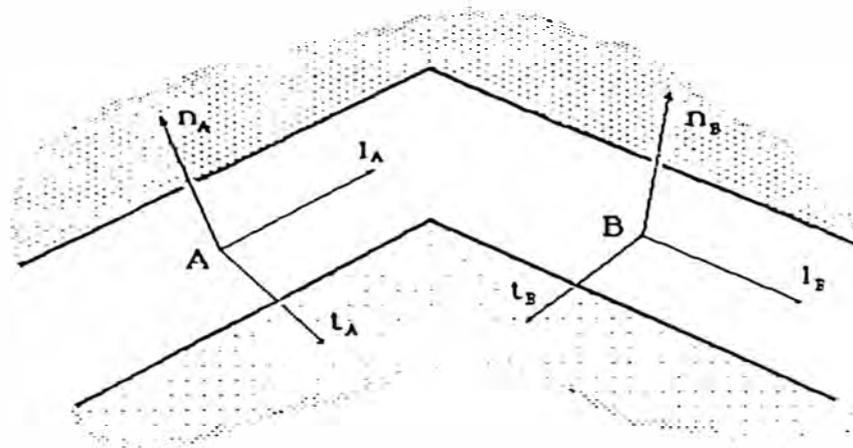


FIG 3.7 DOS SEGMENTOS DE CAMINO RECONSTRUIDOS Y SUS CUADROS DE REFERENCIA LOCALES

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta + \sin \theta \sin \psi \sin \theta & \sin \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \sin \varphi & \cos \phi \sin \varphi \\ -\sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi & \sin \phi \\ -\cos \theta \sin \varphi + \sin \theta \sin \phi \sin \theta & -\sin \theta \sin \varphi - \cos \theta \sin \phi \cos \varphi & \cos \phi \cos \phi \end{bmatrix}$$

Los ángulos de Euler pueden determinarse notando que los elementos de la matriz rotación $R(\theta, \phi, \psi)$ pueden ser identificados con los cosenos directores, así a cada elemento de R se le puede asignar un valor numérico obtenido del dato tridimensional en la referencia de vista centrada, necesitamos sólo calcular los valores de tres elementos y limitar los ángulos de rotación por $\pm 90^\circ$. De esta manera hallamos:

$$\sin \phi = iB \cdot nA$$

$$\sin \theta \cos \phi = -iB \cdot tA$$

$$\sin \psi \cos \phi = tB \cdot nA$$

3.1.3.4. Predictor

Este módulo es usado para enfocar la atención del sistema en una pequeña parte del campo visual. Las ventanas en el campo de vista son determinadas dentro de cual es la ubicación de los bordes del camino, siguiendo un camino ciego el vehículo a través de la representación tridimensional creada de una imagen anterior. Esto se acompaña transformando los datos tridimensionales usados para crear la más reciente representación de acuerdo a la traslación y rotación del cuerpo rígido asociada con el movimiento del vehículo (como es familiar en gráfica por computadora). Los componentes de viaje usado en la construcción de esta transformación se obtienen del cálculo del sistema abordo del vehículo. Una

vez que la representación tridimensional es transformada, se resuelve para la intersección de los bordes del camino con la periferie del campo de vista. Las ventanas de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ son entonces colocadas sobre estos puntos en la parte inferior del campo visual. Como capacidad adicional agregada a este sistema, nuevas rutinas de predicción deben crearse para soportar estas capacidades en el modo de alimentación delantera.

3.1.3.5 Sensor de control

Este módulo es esencialmente una interface al dispositivo asociado con el mecanismo del platillo y ladeo de la cámara. Los cálculos consisten de conversiones entre los ángulos apuntados relativo y absoluto.

3.1.3.6 Navegador

Este módulo debe proveer capacidad de cálculo para soportar la planificación de camino generalizado, por lo que debe estar habilitado para establecer la posición del vehiculo desde las marcas conocidas, generando secuencias de regiones entre la posición actual y el objetivo, y planear caminos del espacio libre mientras evita obstáculos.

Dada una posición y orientación actual del vehiculo, un arco cúbico se deriva y que comienza en el vehiculo, la pendiente en la dirección delantera del vehiculo, y termina a 13m de la línea central del camino, en la dirección de la línea central. Este arco cúbico es usado como un camino para los próximos 3m (alrededor de un vehiculo de longitud) en el cual se deriva un nuevo punto de arco cúbico el cual termina otros 13m adelante. Así el camino del vehiculo será asintótico a la línea central del camino. Cuando se introducen obstáculos en el camino, se debe ajustar el punto terminal de un arco cúbico de modo que ninguna parte del arco intersecte un obstáculo ni cruce los bordes del camino.

En suma, para planear trayectorias espaciales, el navegador debe proyectarse, esencialmente ajustando la velocidad del vehículo en concordancia con la demanda de la geometría del camino.

3.1.3.7 Piloto

Este módulo convierte los arcos cúbicos obtenidos del navegador en una secuencia de comandos convencionales de dirección usados sobre los próximos 3m. Ellos descomponen un camino curvo en un conjunto de pequeños segmentos de línea recta. Estos comandos de movimiento deben interfazar los controles del motor del vehículo. El piloto es también responsable de enviar datos de cálculo muerto desde el vehículo al navegador. El piloto convierte data nueva en viaje medido y retorna esta información al navegador varias veces por segundo.

3.1.3.8 Planeador

Especifica la distancia al objetivo, mueve el punto 60m abajo en el camino. Un módulo de planeamiento tendrá una complejidad arbitraria, especificando alto nivel de navegación a objetivos y asignando prioridades a estos objetivos, monitoreando el progreso como una función del tiempo y construyendo planes de contingencia. También será responsable para ubicar fuentes de cálculo a través del sistema. De modo que hasta el vehículo puede exhibir una variedad de comportamientos. Este desarrollo corresponde a un sistema de navegación visual que recorre alrededor de 3 Km/h.

3.2 Robot de vigilancia terrestre (RVT)

Las condiciones extremadamente hostiles impuestas por el combate moderno, fuera del espacio y en la profundidad del océano han generado la necesidad para vehículos autónomos prácticos para aplicaciones militares y exploraciones del espacio y océano. Estas aplicaciones relativamente

próximas conducirán a la sofisticación y costeo de vehículos de tecnología autónoma en el campo más mundano pero serán posibles aplicaciones más extensas tales como transporte público autónomo.

3.2.1 Problema

El diseño de algún sistema autónomo debe comenzar por definir sus tareas muy específicamente. La tarea de un robot puede ser descrita en términos de su entorno y su objetivo (por ejemplo estas condiciones representan el éxito, fallas y término de tareas). La descripción de una tarea contiene toda la información requerida para especificar el sensado, procesamiento y control, componentes de un robot necesario para lograr la tarea, de modo que, la descripción de la tarea sólo representa una etapa de una parte del problema de construcción de un robot. Los componentes de sensado, procesamiento y control requieren mantener energía y soporte mecánico para mantener sus propias funciones. Estos componentes representan una parte de la realidad de implementación de un vehículo autónomo probado.

3.2.2 Tareas

El robot de vigilancia terrestre está diseñado para transitar desde una ubicación geográfica conocida (dada en algún mapa de coordenadas absoluto) a otra ubicación geográfica conocida sobre terreno natural completamente desconocido. El terreno puede ser de algún tipo sobre el que un vehículo de capacidad comparable pueda atravesar. El RVT debe ahora desarrollar un mapa del territorio en la dirección del objetivo y planear su ruta desde esta única información. De modo que, si está disponible un mapa computarizado del territorio, entonces el RVT estará habilitado para tomar ventaja de su información adicional para mejorar su performance. El terreno natural puede ser descrito en términos de su topografía, la composición de la superficie, la variabilidad de la superficie y el carácter geométrico de los

obstáculos insalvables los cuales pueblan la superficie (como árboles y rocas). La topografía puede incluir planes, superficies variantes continuamente, y superficies discontinuas. La composición de la superficie puede describirse en términos de su composición base y la capa de tierra biológica. Esta descripción del terreno provee información suficiente para identificar áreas impasables y estimar la velocidad promedio a la cual el vehículo puede transitar.

3.2.3 Vehículo

La tarea del tránsito autónomo impone requerimientos de diseño directo en el vehículo. Debe tener sensores para percibir el entorno, efectores para moverse desde un punto a otro y procesamiento el cual identifica acciones del sensor de percepción que llevará al objetivo deseado. El vehículo debe también alimentar energía para soportar el procesamiento, sensado y actividades que efectúe. También debe tener características estructurales para soportar su equipo y protegerlo de condiciones de entorno desfavorables. Adicionalmente, los efectores pueden ser necesarios para controlar la perspectiva de los sensores con campo visual limitado. Los sensores del vehículo deben dar instantáneamente la posición, orientación, obstáculos locales (o más importante, espacio libre) y distancia alrededor de la ruta hacia la ubicación final del objetivo. Lo más importante de los efectores en el vehículo es que proveen movilidad.

El vehículo computarizado presenta un especial reto desde que ahora debe residir en un vehículo en movimiento con toda la aspereza que las condiciones del entorno impongan (por ejemplo, choque, vibración, contaminación, elevada temperatura). El vehículo computarizado debe tener suficiente capacidad para interpretar e integrar los datos de los sensores, el plan de movimientos del vehículo está basado en sensores de cuadro, y controla la respuesta del actuador con la finalidad de estabilizar la velocidad y el movimiento deseado.

3.2.4 Diseño del RVT

Los sensores de capacidades son divididos en los horizontes ,el horizonte más cercano está bajo el vehículo. Los sensores dentro del vehículo proveen posición y orientación, el siguiente horizonte identifica el límite de la capacidad del vehículo para identificar y ubicar obstáculos cercanos. El horizonte final define los límites de la habilidad del vehículo para caracterizar distancias en el terreno. Las características del terreno y condiciones atmosféricas dictarán los límites del rango de los sensores.

La discusión de los detalles del diseño del RVT comienzan con consideraciones de la arquitectura del sistema y entonces proceder. Cada uno de los subsistemas de sensores deben ser ligados juntos de alguna manera, y la arquitectura del sistema provee la salida para hacerlo.

3.2.4.1 Arquitectura del sistema

El primer elemento de una arquitectura es el modelo de como los subsistemas son particionados, las funciones acopladas estrechamente deben conectarse a través de un camino de comunicación de gran ancho de banda. Por otro lado las funciones acopladas ligeramente pueden ser particionadas en módulos de alto nivel con considerable parte de información variando lentamente. La mayoría de los subsistemas son agrupados en funciones de alto nivel las cuales se comunican simbólicamente por intercambio de información alrededor del mundo percibido. El modelo de interacción entre todos los subsistemas fue un modelo pizarra, este modelo de interacción se ilustra en la Fig. 3.8. La elección del subsistema mayor fue hecho con los avance provistos por la actual tecnología, por lo que el modelo soporta alguna repartición de funciones.

Mientras el paradigma de interacción pizarra provee muchos beneficios en términos de programación del sistema, este no es un modelo realista para su implementación. Así, los mayores subsistemas implementados son grupos multiprocesadores acoplados los cuales se comunican a través de redes de

área local como se ilustra en la Fig. 3.9 . Los componentes dentro de cada módulo mayor se comunican a través de memoria compartida habilitando así el tiempo de sensado requerido para acoplar procesos tales como control del vehículo. Cada módulo mayor está acoplado a la red de área local a través de un módulo llamado interfase de comunicación inteligente (ICI). Este dispositivo hace que cada módulo piense que está efectivamente compartiendo una memoria (pizarra) inteligente con todos los otros módulos. Los componentes del ICI están ilustrados en la Fig. 3.10.

La pizarra es un dispositivo conceptual el cual permite intercambio de información entre los subsistemas del RVT. la pizarra provee una representación clara y consistente de esta información, la cual puede ser usada para desarrollar componentes subsistemas individuales, esto significa que ninguna persona necesita entender completamente en sistema total. Físicamente, la pizarra consiste de varias piezas de memoria distribuida compartida a través de los subsistemas. El acceso a los procesos distribuidos provisto por el ICI para esta memoria compartida determina la consistencia del control, luego los subsistemas dentro del mismo módulo accesan la memoria pizarra a través de procedimientos de interfase estándar, y estos procedimientos proveen mecanismos bien definidos para la lectura y escritura de elementos a y desde la pizarra, y esta es estructurada en una clase de árbol, donde cada elemento de este árbol tiene una lista de propiedades para los que están valores asignados. Este paradigma de representación es comúnmente usado en sistemas expertos y otros sistemas basados en el conocimiento.

Los elementos menores de una clase heredan todas las propiedades asociadas con una clase mayor y son distinguidas sólo por la propiedad de valor único para estos elementos. Así el mecanismo hereditario de esta clase de árbol provee un método de representación económico.

Obviamente esta pizarra provee la oportunidad para mucho más que simple comunicación de varios valores de datos entre subsistemas, de

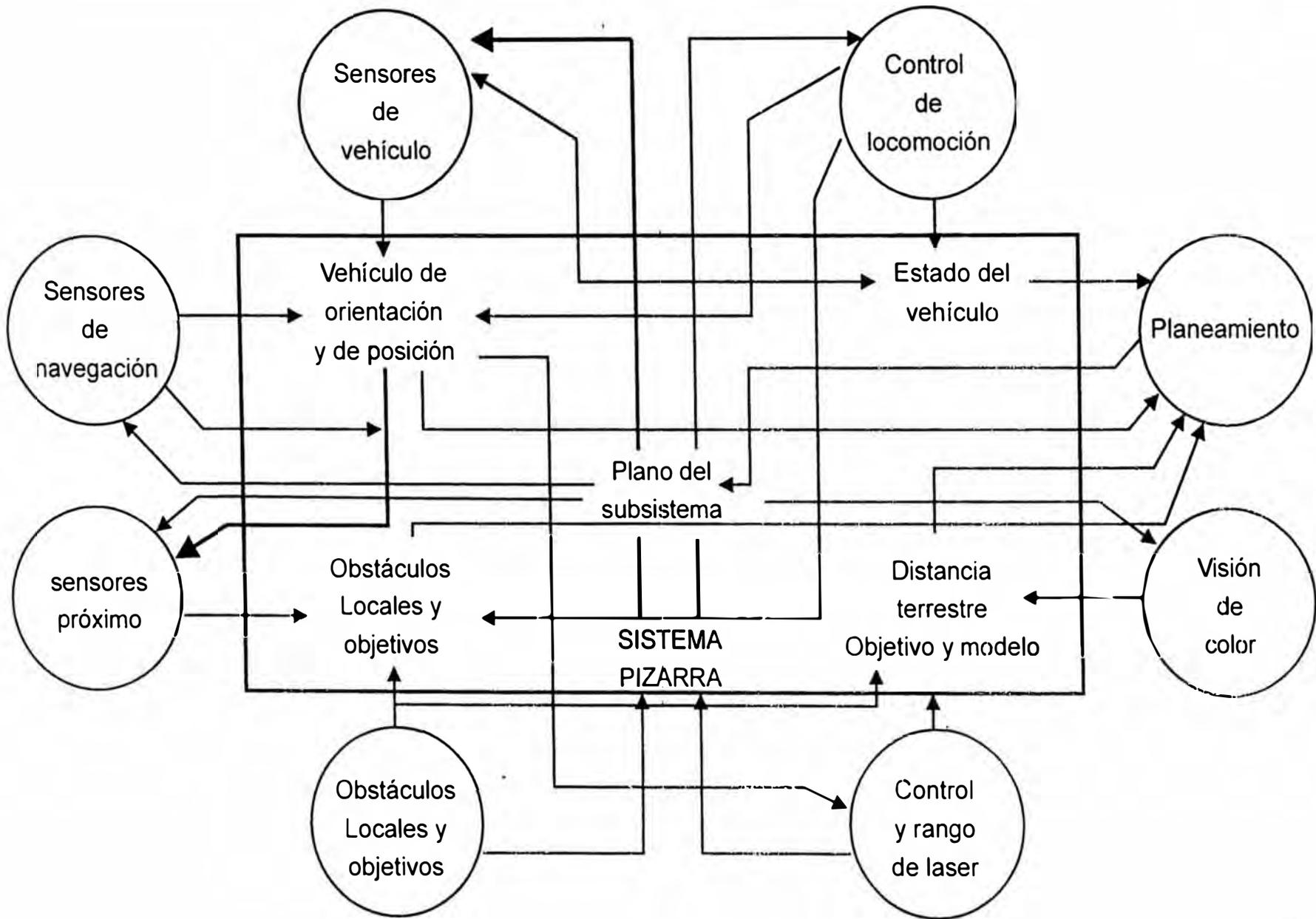
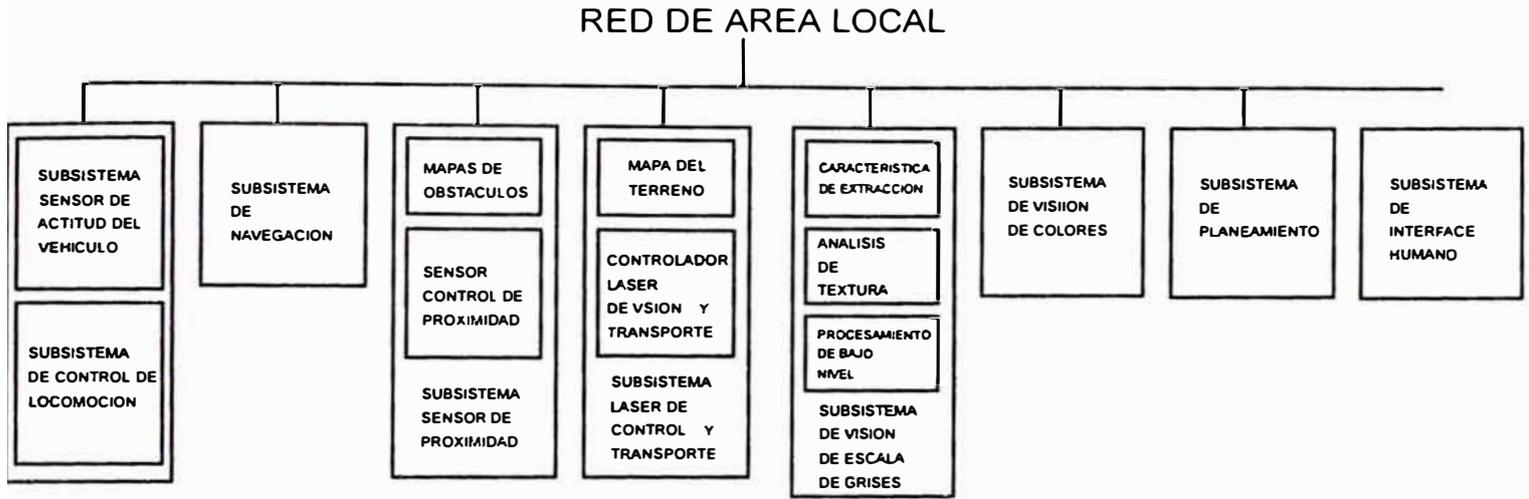


FIG. 3.8

MODELO DE PIZARRA DE INTERACCION DE SUBSISTEMAS



SIN IMPLEMENTAR

FIG. 3.9 ARQUITECTURA DEL SISTEMA ROBOT DE VIGILANCIA TERRESTRE

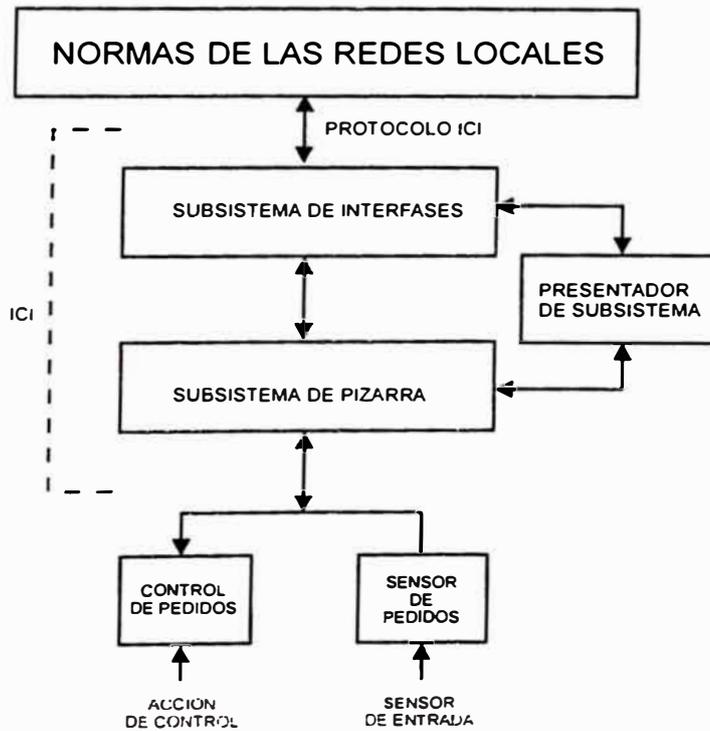


FIG 3 10 COMPONENTE DE INTERFASE DE COMUNICACION INTELIGENTE

hecho, la pizarra provee un mecanismo muy poderoso a través del cual se fusionan varios tipos de datos sensados, y esta fusión requiere una representación consistente y varios métodos para combinar los datos. Desafortunadamente, hay casos cuando dos valores reflejan la misma propiedad en la pizarra y deben ser fusionados, esta situación de fusión de datos es mucho más compleja, y varios métodos pueden ser usados para combinar datos superpuestos que incluyen filtrado, decisión y guiado. La fusión usando filtrado puede ilustrarse por filtrado de Kalman o interpolación lineal (fig. 3.8)

3.2.4.2 Movilidad y control del vehículo

El subsistema del vehículo es el mayor efecto de cualquier robot móvil. La Fig. 3.11 muestra una vista superior del dibujo del vehículo y las ubicaciones de los varios sensores montados externamente. Varias características se agregan a este vehículo para permitir la instalación de sensado y cómputo en la tarjeta. Esto incluye un conjunto generador de potencia auxiliar, un aire acondicionado grande, un mueble de equipos montados.

El subsistema de control de locomoción supervisa todos los equipos en el RVT que están asociados con su movilidad. Esto incluye las válvulas del vehículo, frenos, timón, y cambios de transmisión así como modos de cambiar el timón, encendido de la máquina y encendido del generador de potencia auxiliar. La mayoría de control de ejes actúan usando torque eléctrico de motores controlados a través de servo amplificadores, y esto permite un mayor nivel de control del computador y aplica tecnología desarrollada para control computacional de carga terminal. El lazo del servo freno es cerrado alrededor de la cual la fuerza aplicada es medida al nivel de freno con una carga, este arreglo hace que el actuador de freno se auto-ajuste así como reduce la posibilidad de saturación de los componentes mecánicos del mecanismo de freno.

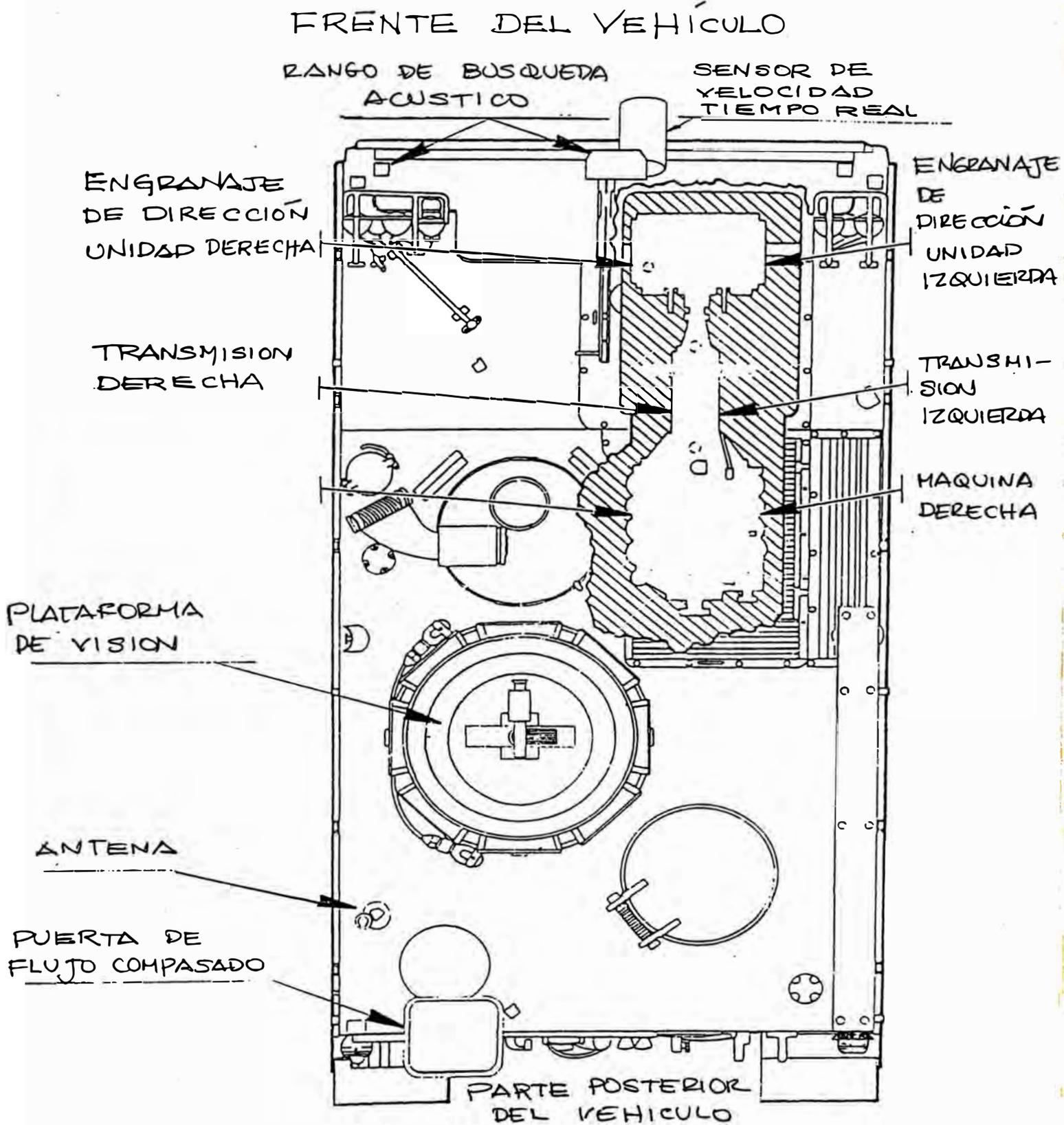


FIG. 3.11

DISTRIBUCION EXTERNA DE SENSORES DEL RVT

El control computarizado de locomoción provee acceso al actuador de locomoción, y así, al último control del camino del vehículo. El control computarizado de locomoción mapea las posiciones de paredes de contacto, un vehículo destino, objetivos locales y obstáculos idealizados. También genera un corto rango de ajuste del camino del vehículo y calcula la posición deseada del actuador para lograr estos cambios, los cambios deseados en el camino del vehículo son calculados desde la pared, destino, obstáculo, y posición de objetivos usando la técnica de control de campo potencial, en estas técnicas, los objetivos tienen campos atractivos y los obstáculos campos repulsivos, y la información de la posición de los objetos tales como paredes, vehículos destino y otros obstáculos próximos son usados para calcular las fuerzas existentes sobre el vehículo. Los cambios en el campo potencial total son calculados por superposición de todos los campos atractivos y repulsivos para determinar un vector fuerza resultante, y los cambios de movimiento del vehículo son calculados desde este vector fuerza y usados con leyes de control lineal convencional para determinar las posiciones deseadas del actuador.

3.2.4.3 Posición y orientación del vehículo

La posición y orientación del vehículo se determinan usando la información de la postura del vehículo y los sensores del subsistema de navegación.

Los sensores de posición del vehículo proveen información de la posición relativa del vehículo, rodamiento, ángulos de giro e inclinación, velocidad de avance y velocidad de rotación. La complejidad derivada de esta información es usada por los sensores con limitaciones finitas de esfuerzo. Por ejemplo, los sensores de velocidad son inexactos sobre ciertos rangos, luego el sensor de velocidad provee buena información cuando el vehículo está viajando lentamente y sobre terreno donde el vehículo tiene buena tracción, así el sensor de velocidad Doppler provee información correcta sólo a

velocidades relativamente altas (por ej. > 2 m/s). Similarmente, el girocompás de dirección que es un compás magnético es influenciado por anomalías magnéticas locales, y así ninguno de estos sensores de dirección provee información completamente exacta todo el tiempo, y en ambos casos un algoritmo se usa para decidir el uso de cualquiera de las mediciones de los sensores.

El subsistema de navegación provee precisión y acceso continuo a la posición del vehículo, esto se hace usando sensores de cálculo muerto para medición de posiciones relativas continuas y un sistema de navegación por satélite el cual provee la posición absoluta intermitentemente. La información de estas dos fuentes de posición debe ser fusionada para proveer una posición absoluta del vehículo estimada continua y confiable. La estimación de posición obtenida de los sensores de cálculo muerto está disponible continuamente y altamente precisa para cortas distancias viajadas. Desafortunadamente, estos rumbos de posición estimada derivan en la acumulación de errores inherentes a la medición de posición relativa. La navegación por satélite provee mediciones de posición absoluta bastante precisa (por ejemplo dentro de los 100m) los cuales no enrumban a tener estimados absolutos derivados de la integración de la información de posición relativa, y además no están continuamente disponibles.

3.2.4.4 Eludir obstáculos

La actividad de eludir obstáculos puede dividirse en percepción de obstáculos y el control necesario del vehículo para evitarlos. El cuidado del mapa de obstáculos locales se mantiene por el subsistema sensor de proximidad con alguna ayuda del subsistema de visión. El controlador del sensor de proximidad controla las posiciones de los sensores acústicos activos así como el preproceso de retornos nuevos. El sensor de proximidad asimila todos los sensores de retorno provistos por el sensor controlador en un mapa coherente de obstáculos locales.

El subsistema sensor de proximidad consiste de siete sensores acústicos Polaroid con un ancho de mira de aproximadamente 30° y un rango máximo de aproximadamente 10m, y una resolución de aproximadamente 0,17m. Los sensores han sido concentrados en frente del vehículo ya que viaja hacia adelante la mayor parte del tiempo. Los arreglos de estos sensores se muestran en la Fig. 3.11. El arreglo de estos sensores se fija mirando al frente del vehículo y separados cada uno 30° del azimut, y pueden rotar aproximadamente 180° azimutalmente.

El sensor controlador de procesamiento actúa como un pequeño sistema operativo que ubica los recursos dependiendo de la condición de la tarea a la mano. Tres tareas son posibles: seguimiento de un vehículo móvil, evitando una pared y hallar una vía a través de un campo de obstáculos hacia un objetivo distante. El sensor de recursos incluye acceso a un sensor, acceso a una región y bloqueo de otro sensor debido a la interacción del mismo potencial (por ejemplo a través de interferencia electromagnética). El sensor controlador recibe el eco nuevo, retorno de filtros, cálculo de rangos de objetos y relación aproximada, y estimación de la velocidad angular del objeto. El sensor controlador coloca datos importantes en la pizarra (por ejemplo tiempo crítico de datos tal como vehículo destino, posiciones de paredes y velocidades relativas), envía todos los datos filtrados al mapa del sensor de proximidad.

Están disponibles varios esquemas de ubicación de sensores para el sensor controlador dependiendo de la tarea a ejecutar. Esta flexibilidad es la principal ventaja de tener sensores fijos y guiados. El sensor controlador también puede usar múltiples retornos desde el mismo destino para hacer estimaciones de la velocidad relativa del destino, estas estimaciones pueden también usarse junto con rango y abertura angular para ayudar a diferenciar un vehículo destino de el entorno.

Los sensores de rango acústico son usados para sensado de varias formas de interferencia, estas incluyen retorno reflejado de otros sensores,

interferencia electromagnética de otros sensores próximos y ruido eléctrico producido por motores eléctricos que mueven los sensores así como otras fuentes. Todas estas formas de interferencia deben ser consideradas cuando se determina el orden de movimiento de varios sensores.

El mapeador de sensor de proximidad transforma todo el rango y la información de rumbo recibido del controlador de sensor de proximidad en el cuadro de referencia absoluto, usando información de la posición del subsistema sensor de navegación, y construye un mapa de obstáculos locales desde el dato. La información llevada por el sensor de datos nuevos es fusionada en una única estimación coherente de posición de obstáculos próximos representando cada retorno por una distribución que representa la probabilidad que un obstáculo reflectante fuera detectado y por superposición las distribuciones asociadas con cada sensor de medición.

El mapeador del sensor de proximidad también puede requerir cobertura de sensores adicionales desde el controlador del sensor de proximidad en la dirección de áreas desconocidas, así las pérdidas de acoplo entre el mapeador y el controlador limita la comunicación entre estos elementos a un mínimo, y aún así permite al mapeador conseguir datos adicionales donde exista desaparición o ambigüedad de información. La visión de datos también se puede usar para coordinar la proximidad de recursos de sensores a través del controlador, para mejorar el mapa de obstáculos locales y habilitar el seguimiento de mayores características del terreno a partir de la información del mapeo de terreno distante.

3.2.4.5 Modelo de terrenos

Los sensores del RVT proveen la información para modelar terrenos que consisten de un láser el cual puede hacer mediciones de rango de acceso aleatorio dentro del campo de vista de las cámaras a alta resolución (por ej. 512x490) escala de grises, cámara de estado sólido y una cámara a color de baja resolución. Todos estos sensores son montados en plataformas de transporte de visión de tres grados de libertad. El problema de desarrollar un

modelo de terreno desde los datos de estos sensores es dividido en subproblemas de procesamiento de bajo nivel de escala de grises, procesamiento a color de bajo nivel, análisis de textura en escala de grises, análisis sobre tierra, procesamiento de datos de rango laser de bajo nivel, construcción de segmentos de terreno e integración de la descripción de terrenos. Este procesamiento consiste en supervisar cual información integrar de los sensores del vehiculo, mapas de terreno y planes de caminos de movimiento.

La visión de la plataforma de transporte permite la mejor utilización del modelo de terreno sensado el cual tiene relativamente angosto campo de vista. Esta plataforma habilita la visión de sensores que son elevados 1,5m y rotados en azimut aproximadamente 360° , esto permite elevación del ángulo de la cámara para ser controlado entre 30° arriba y 15° abajo de la horizontal.

Una propia representación debe elegirse para facilitar la integración de los datos desde múltiples sensores usados para modelar terrenos. Una representación consistente se agrega en la distribución y control de consistencia necesario para una implementación distribuida. El mecanismo de la pizarra es usado para proveer un formato general para representación. Dentro del modelo de pizarra, el modelo del mundo organiza los datos en una clase de árbol con propiedades inherentes, específicamente, los datos del terreno son representados como segmentos triangulares con las propiedades de posición absoluta, orientación, adyacencia, una función de modificación del terreno, espectro de variabilidad, tipo de terreno y estadística de obstáculos comunes. Esta representación provee suficiente información para facilitar la planificación de rutas, también evita los problemas asociados con poligonos convexos mientras provee un buen segmento de terreno primitivo.

La planificación de ruta en situaciones desconocidas tiene dos submetas que interactúan de la suficiente colección de información para habilitar la

planificación efectiva y hacer progresos actuales de delante hacia el objetivo final. La distribución de la actividad del robot entre estos objetivos debe ser optimizada para llegar al objetivo tan rápido como sea posible. En general, la ruta planeada minimiza una función costo basada en los requerimientos de energía, el riesgo estimado desconocido, la velocidad de tránsito del vehículo estimada y la distancia al objetivo. Esta función es muy similar conceptualmente a muchas otras aproximaciones a problemas de planificación de rutas similares, el RVT planea la ejecución de esta función desde la ubicación presente del vehículo a la ubicación del objetivo final si la información del mapa es suficiente y está disponible internamente. De modo que, si el terreno entre la ubicación presente del vehículo y el objetivo final se desconoce, entonces el sensor planea la colección de información del terreno dentro del horizonte de sensado. Si el objetivo final no está dentro del rango del sensor entonces se elige un objetivo intermedio, el cual provee un mejor acercamiento al objetivo final, ganando nueva información del mejor punto de vista ventajoso, y minimizando el consumo de energía y tiempo de viaje. De esta manera, el proceso de transitar terrenos desconocidos consiste en transitar desde un objetivo intermedio dentro del horizonte del sensor.

CONCLUSIONES

- 1. La necesidad creciente de contar con líneas de producción en serie más sofisticadas, o para exploración de zonas peligrosas o manipular compuestos peligrosos, permite amplios desarrollos e investigación en el campo de la robótica y automatización**
- 2 La robótica y automatización, están teniendo cada vez mayores campos de aplicación, desde educativa hasta salud, o desde industrial a agrícola, por lo tanto debe ser necesario probar la gran cantidad de investigaciones y trabajos teóricos desarrollados en estos campos para conseguir mayores resultados de desarrollo social.**
- 3. La visión en robots es un concepto que ayudará mucho en los desarrollos en robótica, ya que esto permitirá ampliar la capacidad de desplazamiento y exploración de robots.**

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Introduction to Robotics: Mechanics and Control**
Craig J.J.
- 2.- Robotics and Automatic Manufacturing**
Dorf, R.C.
- 3.- Robot Manipulators: Mathematics, Programmng and Control**
Paul, R.P.
- 4.- Appled Dynamic Programming**
R.E. Bellman y S.E. Dreyfus
- 5.- Structure of Intelligence for an Autonomous Vehicle**
R. Chávez y A Meystel
- 6.- Mecánica Clásica**
H. Goldstein
- 7.- Computarized Guidance and Process Control**
J. Doherty, S.J. Holder y R. Baker
- 8.- Análisis y Control de Brazos Articulados Robots con Redundancia**
H. Hanafusa, T. Yoshikawa y Y Nakamura

9.- Dinámica de Estructuras

W.R. Clough y J. Penzien

10.- Sistemas Automáticos de Control

B. Kuo