

Proyecto de grado

Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales

Posicionamiento y Sensor Data Fusion

Santiago Martínez, Rafael Sisto

pgomni@fing.edu.uy

<http://www.fing.edu.uy/~pgomni>

Tutor

Gonzalo Tejera

Cotutores

Facundo Benavides, Santiago Margni

Versión 1.0

Instituto de Computación
Facultad de Ingeniería - Universidad de la República
Montevideo - Uruguay

8 de agosto de 2009

Resumen

Este documento tiene como objetivo introducir al lector en los conceptos de posicionamiento y *Sensor Fusion*. En el mismo se describen distintos tipos de sensores utilizados para el posicionamiento de los objetos en el mundo (ambiente de trabajo para el robot). Además, se introducen los conceptos generales de fusión de datos sensoriales (o *sensor fusion*), el estado del arte en las técnicas de esta fusión así como principios básicos en base a experiencia empírica de las referencias consultadas.

Este documento comienza introduciendo al lector en el problema de la percepción y posicionamiento. Finalmente, se describen distintos marcos de trabajo (o *frameworks*) para el desarrollo de sistemas para la fusión de sensores, orientado al modelado dinámico del mundo así como orientado al comportamiento.

Índice

1. Introducción	9
2. Posicionamiento Básico	11
2.1. Dead Reckoning u odometría	11
2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	12
2.3. Visión global utilizando video	12
2.4. Sensores de proximidad.	13
3. Sensor Data Fusion	15
3.1. Sensor Fusion orientado al modelado del mundo.s	15
3.1.1. Framework general para el modelado dinámico del mundo	16
3.1.2. Técnicas para fusión de datos numéricos	17
3.2. Sensor Fusion orientado a comportamiento	18

Índice de figuras

1.	Sistema de Posicionamiento Global utilizando sonares[2].	11
2.	Parches utilizados por ERGO. Areas negras fijas permiten reconocer la orientación, mientras los valores blancos o coloreados en lugares 1 a 6 representan la identidad[1].	13
3.	Captura del sistema ERGO. En este ejemplo se muestra una escena con baja iluminación[1].	13
4.	Transductor ultrasónico Polaroid[5]	14
5.	El anillo de sensores IR del robot Khepera. Cada cubo negro montado en tres patas es un emisor y receptor[5]	14
6.	Ejemplo de anillos de sonares redundantes[5]	15
7.	Un modelo para el modelado dinámico del ambiente[3].	16
8.	Diagrama de flujo de datos de Sensor Fission[5]	18
9.	Diagrama de flujo de datos de <i>Sensor Fusion</i> [5]	18
10.	Diagrama de flujo de datos de Sensor Fashion[5]	18

1. Introducción

El posicionamiento y la navegación son las tareas más importantes de los robots móviles[2]. Es de gran importancia saber la posición del robot, y es necesario generar un plan de como alcanzar un cierto destino ó meta. Estos dos problemas no siempre se pueden tratar de forma independiente ya que muchas veces están relacionados. Si un robot no conoce su posición exacta al comenzar una trayectoria planificada, se enfrentará a problemas para alcanzar el destino.

Debido a esto, se han desarrollado muchas técnicas de posicionamiento de robots, las cuales serán puestas en foco en este documento.

En las siguientes secciones se describirán los métodos y técnicas más comunes del posicionamiento de robots. Luego de ésto se introducirá el concepto de *sensor fusion*, describiendo sus distintas aplicaciones en la industria y la academia, con el objetivo de introducir al lector en los conceptos más utilizados en este ámbito.

2. Posicionamiento Básico

Uno de los principales problemas de los robots móviles es el posicionamiento. Para muchas aplicaciones, se necesita saber la posición del robot y la orientación en todo momento. Por ejemplo, un robot de limpieza necesita asegurarse de cubrir toda la superficie sin repetir zonas o incluso perderse. Otro ejemplo podría ser un robot encargado de realizar las entregas en una oficina, el cual necesita poder navegar a través de un edificio y además conocer su posición y orientación relativa a su punto de comienzo. Este problema no es trivial en ausencia de sensores globales. El problema del posicionamiento puede ser resuelto utilizando un sistema de posicionamiento global. En una aplicación al aire libre podría ser resuelto utilizando GPS basado en satélites. En un ambiente cerrado se podría resolver utilizando una red de sensores con estaciones infrarrojas, sonares, laser ó radio como se puede ver en la figura 1.

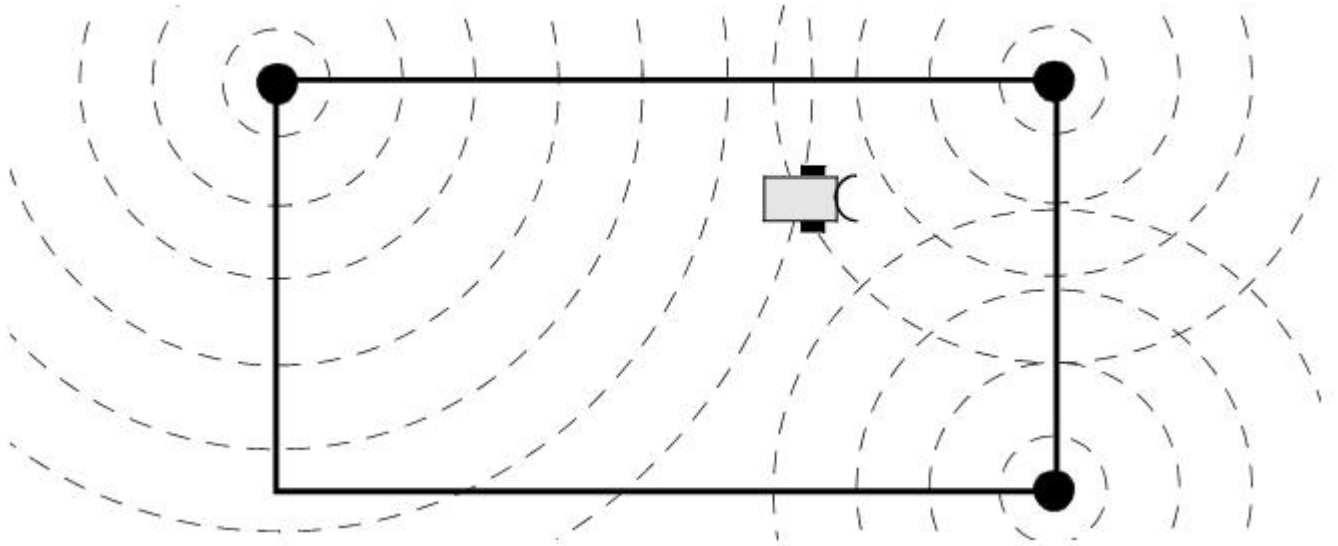


Figura 1: Sistema de Posicionamiento Global utilizando sonares[2].

En muchos casos no es posible (o no deseable) utilizar sensores globales debido a que esto limita la autonomía de un robot móvil. Por ejemplo, cuando se utiliza una cámara para visión global sobre una habitación, se limita la autonomía del robot dentro de esta habitación. Por otro lado, en algunos casos es posible convertir un sistema con sensores globales como visto en la figura 1 en un sistema con sensores locales. Por ejemplo, si estos sonares pueden montarse en el robot y donde estaban éstos se colocaran marcas reflectivas, entonces se tendría un robot autónomo utilizando sensores locales[2].

A continuación se describen distintos sistemas utilizados para el posicionamiento de robots móviles.

2.1. Dead Reckoning u odometría

El posicionamiento relativo de un robot usualmente se basa en *dead reckoning* u odometría, esto es, prediciendo la nueva posición del vehículo realizando cálculos basados en las velocidades de las ruedas y su dirección. En la mayoría de los robots la odometría se implementa utilizando **decodificadores ópticos** que brindan información de la rotación de las ruedas, y el ángulo de giro. Los datos de los codificadores se utilizan luego para calcular el desplazamiento a partir de cierta posición inicial conocida. La odometría es simple de implementar, poco costosa de computar y posible de lograr en tiempo real. La desventaja de este método es que el error en la precisión es acumulativo en cada cálculo sucesivo. Esto es debido al deslizamiento de las ruedas y a que existe imprecisión en las lecturas de los sensores ópticos. Este método generalmente se utiliza en conjunto con sistemas de posicionamiento global para complementar el error acumulado.

Otra tecnología utilizada para odometría son los sistemas de navegación inercial (Inertial Navigation Systems o INS). INS mide movimientos electrónicamente a través de acelerómetros en miniatura. Mientras los movimientos sean suaves, sin golpes o movimientos bruscos, y las muestras sean tomadas con frecuencia, un INS puede proveer odometría precisa al 0.1 por ciento de la distancia recorrida. Sin embargo, esta tecnología no es viable para robots

móviles por distintas razones. El costo de un INS varía entre \$50.000 y \$200.000 dólares americano.. Este alto costo se debe en parte a que los acelerómetros se deben estabilizar con giroscopios, además del costo natural de la precisión en la electrónica. Los robots móviles generalmente violan la restricción de realizar movimientos suaves, ya que frecuentemente reciben golpes o giros bruscos pudiendo exceder el rango de la medida de los acelerómetros introduciendo errores. Los sistemas INS son utilizados generalmente para grandes sistemas, no así los dispositivos pequeños, ya que generalmente tienen menos precisión[5].

2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Los Sistemas de Posicionamiento Global (Global Positioning System o GPS) funcionan recibiendo señales de satélites que orbitan la tierra. El receptor triangula su propia posición en términos de latitud, longitud, altitud y cambios en el tiempo.

Actualmente los únicos satélites disponibles para que un receptor pueda triangular su posición son los de la constelación Navstar mantenido por el Comando del Espacio de la Fuerza Aérea Estadounidense, o la contraparte rusa, GLONASS, mantenida por el Ministerio de Defensa de la Federación Rusa.

Existe además un método conocido como Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (Differential Global Positioning System o DGPS), en el cual se utilizan dos receptores GPS. Uno de ellos permanece estacionario y el otro se coloca en el robot. Si los dos receptores ven a los mismos satélites, entonces un cambio de posición de la base estacionaria se debe al error introducido y ser sustraídos de las lecturas del receptor colocado en el robot.

Los Sistemas de Posicionamiento Global poseen la desventaja que no funcionan correctamente en lugares cerrados, como por ejemplo edificios reforzados con acero o espacios abiertos donde los rascacielos funcionan como un “cañón urbano”. Por otro lado, los sistemas DGPS comerciales tienen costos en el orden de los \$30.000 dólares americanos, lo cual lo convierte en prohibitivamente caro[5].

2.3. Visión global utilizando video

Los sistemas de posicionamiento basados en visión global involucran el uso de cámaras de video fijas en cierta posición que capturan los movimientos de los objetos en un área delimitada.

Estos sistemas son utilizados comúnmente en el ámbito académico, de forma de simplificar a los estudiantes la tarea de percepción del ambiente. Por lo general es posible desarrollar proyectos robóticos interesantes utilizando sensores simples: un único sonar, por ejemplo, puede ser utilizado para evadir obstáculos enfrentados al robot, mientras un sensor de luz detecta una meta simple para el robot. Sin embargo, la sofisticación de las aplicaciones resultantes estará limitada sin visión global.

El problema con estos tipos de sensores es que generan una enorme cantidad de datos, además de requerir algoritmos sofisticados para lidiar aún con problemas simples como reconocimiento de formas básicas, manejo de ruido y seguimiento de objetos en el tiempo.

Los sistemas de visión global utilizando capturas de video comparten muchos de los problemas asociados a la visión local. Los objetos de interés deben ser identificados y rastreados, lo cual requiere lidiar con cambios en su apariencia debido a cambios en la iluminación y perspectiva, sin embargo en la actualidad existen algunos sistemas desarrollados que mitigan este problema.

A continuación se dará un ejemplo de estos sistemas de visión.

ERGO (Furgale, Anderson, & Baltes 2005) El sistema ERGO permite rastrear objetos posicionando la cámara en cualquier posición, mientras el ángulo de la cámara vea la totalidad del área de trabajo. A su vez, envía un paquete UDP¹ por Broadcast ² conteniendo las posiciones actualizadas de los objetos registrados.

Este sistema es una versión mejorada de su predecesor DORAEMON (Anderson & Baltes 2002; Baltes 2002) de forma de combatir ciertas debilidades que poseía, a notar: DORAEMON tiene un sistema precario para combatir oclusión entre objetos y es muy dependiente de los cambios en la iluminación, lo cual requiere calibrar nuevamente el sistema.

ERGO utiliza parches determinados que deben ser colocados sobre los objetos a rastrear, los que se pueden ver en la figura 2, de forma que el sistema pueda reconocer la identidad del objeto asociado y su orientación. A su vez, en la figura 3 se puede ver una captura del sistema ERGO siendo utilizado para reconocer parches en un área con poca iluminación.

¹User Datagram Protocol

²Forma de transmisión de un paquete de red que será recibido por todos los dispositivos en una red

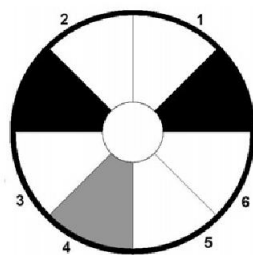


Figura 2: Parches utilizados por ERGO. Áreas negras fijas permiten reconocer la orientación, mientras los valores blancos o coloreados en lugares 1 a 6 representan la identidad[1].

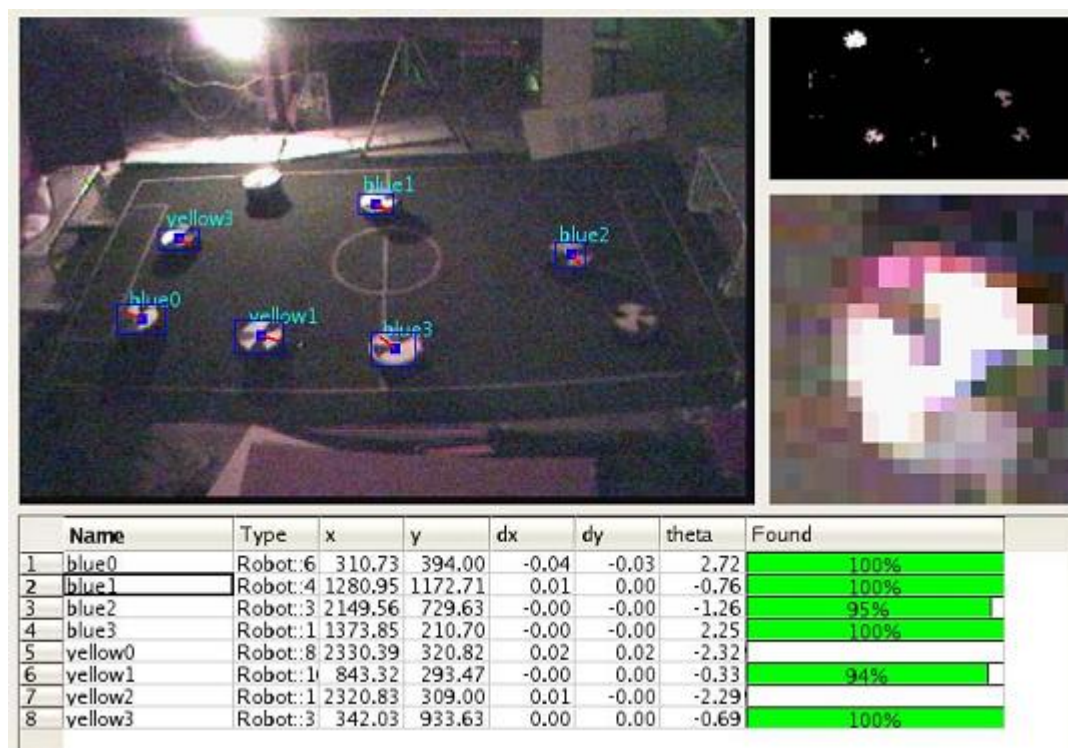


Figura 3: Captura del sistema ERGO. En este ejemplo se muestra una escena con baja iluminación[1].

2.4. Sensores de proximidad.

Los sensores de proximidad miden la distancia relativa entre el sensor y los objetos del ambiente. Debido a que el sensor está montado en el robot, se requiere un simple cálculo para transformar la distancia relativa del sensor a una distancia relativa del robot. Los sensores más populares de este tipo son los Sonares (también conocidos como ultrasonido). Le siguen en popularidad los sensores infrarrojo, choque y contacto[5].

Sonar o ultrasonido Sonar se refiere a cualquier método de medir distancias mediante el uso de sonido. Los sonares, según su aplicación, operan a distintas frecuencias; por ejemplo, un sonar para vehículos submarinos utilizan una frecuencia apropiada para viajar por el agua, mientras que para un vehículo terrestre se utiliza una frecuencia apropiada para viajar por el aire.

El funcionamiento de estos sensores es el siguiente: emiten un sonido y miden el tiempo que demora el sonido en retornar luego de un rebote. A este tiempo se le llama *tiempo de vuelo*; utilizando este tiempo y la velocidad del sonido en ese medio (la cual varía dependiendo del medio en que se encuentre y la densidad. Recordar que incluso la densidad del aire varía con la altura) es suficiente para conocer la distancia al objeto contra el cual rebotó la señal.

En la figura 4 se puede ver un transductor sonar. El transductor consiste de una membrana metálica. Un pulso eléctrico genera una onda, causando que la membrana produzca un sonido. Mientras tanto se comienza un

temporizador y la membrana se convierte en estacionaria. El sonido reflejado, o eco, hace vibrar a la membrana. Este sonido se amplifica y se verifica que su potencia se encuentre dentro del umbral de la señal de retorno. En caso de ser muy pequeño, se asume que el sonido es ruido y se ignora. Si la señal es suficientemente potente para ser válida, el temporizador se para indicando el *tiempo de vuelo*.



Figura 4: Transductor ultrasónico Polaroid[5]

Infrarrojo (IR) Los sensores infrarrojos son otro tipo de sensores de proximidad. El funcionamiento es el siguiente: emiten una señal casi infrarroja y sensan si se retorna una cantidad significativa de luz IR. De ser así, existe un obstáculo presente, retornando una señal binaria.

El rango de estos sensores varía desde algunas pulgadas hasta varios pies, dependiendo de la frecuencia de luz utilizada y la sensibilidad del receptor. El sensor de proximidad IR más simple puede ser construido utilizando LEDs ³, los cuales emiten luz hacia el ambiente y tienen un rango de 3 a 5 pulgadas. La figura muestra los emisores y receptores IR de un robot. Estos fallan en la práctica debido a que la luz emitida es “borrada” causado por luces ambiente brillantes o absorción de luz por materiales oscuros (el ambiente posee demasiado ruido). Los sensores IR más sofisticados permiten seleccionar diferentes bandas IR o modulados para cambiar el coeficiente señal-a-ruido.

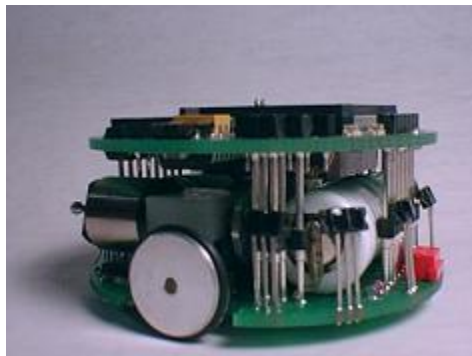


Figura 5: El anillo de sensores IR del robot Khepera. Cada cubo negro montado en tres patas es un emisor y receptor[5]

Choque y contacto Otra clase popular de sensores robóticos es la de contacto, construida con sensores de Choque y contacto. Estos son construidos usualmente utilizando dos capas de material conductor, las cuales cierran un circuito al estar en contacto.

³Diodo emisor de luz, del inglés Light Emitting Diode.

3. Sensor Data Fusion

Sensor Fusion es un término amplio que se utiliza para cualquier proceso que involucre combinar información de múltiples sensores en una única medición. Existen tres estrategias básicas para combinar sensores: *redundante* (sensores que compiten), *complementario* y *coordinado*.

En algunos casos se utilizan múltiples sensores cuando un sensor en particular es muy impreciso o ruidoso como para dar datos confiables. Al agregar un segundo sensor, se puede obtener otro “voto” para una cierta percepción.



Figura 6: Ejemplo de anillos de sonares redundantes[5]

Cuando dos sensores retornan una misma percepción, éstos son considerados *redundantes*. Un ejemplo de *redundancia física* se puede ver en la figura 6 donde el robot tiene dos anillos de sonares. El sistema retorna la menor distancia sensada de los 2, proveyendo una lectura mas confiable para objetos bajos, que normalmente no serían sensados por los sonares superiores. Los sensores pueden tener además redundancia lógica, cuando sensan el mismo objetivo, pero se utilizan distintos algoritmos para procesar los datos sensados. Un ejemplo de esto es cuando se extrae la distancia a un objeto utilizando un telémetro óptico⁴ y un telémetro laser⁵. Los sensores redundantes a veces se pueden denominar *competitivo*, ya que pueden ser vistos como que compiten para publicar la percepción “ganadora”.

Los sensores *complementarios* provee tipos disjuntos de información sobre un objeto.

Los sensores *coordinados* utilizan una secuencia de sensores, usualmente de forma de proveer un foco de atención. Por ejemplo, un depredador ve movimiento, causando que éste pare para examinar con detención la escena en busca de señales de una presa[5].

Actualmente se le han dado dos usos distintos a *Sensor Fusion*. Por un lado se puede utilizar para generar un modelo del mundo con mayor precisión (este puede ser a su vez numérico ó simbólico), o puede ser incorporado a los comportamientos a través de *sensor fusion*, *sensor fusion orientado a acciones* y *sensor fashion*. En la siguiente sección se describirán estos conceptos.

3.1. Sensor Fusion orientado al modelado del mundo.s

Esta sección describe un framework general para el modelo dinámico del mundo desarrollado por Crowley[3]. El problema de *sensor fusion* se toma como punto fundamental en este proceso.

La sección comienza con la descripción del modelado dinámico del mundo como un proceso iterativo de convertir las observaciones en una descripción interna. Este proceso provee un framework en el cual se examinan problemas de *sensor fusion*. Con el uso de este framework, se derivaron ciertos principios para la fusión de sensores. Estos principios se describen en las siguientes secciones aplicados a las distintas fases del proceso cíclico que componen el framework.

⁴Un telémetro óptico consta de 2 objetivos separados una distancia conocida. Con ellos se apunta un objeto y la distancia se puede calcular mediante el uso de trigonometría

⁵El telémetro láser es capaz de realizar medidas de distancia como el ultrasónico

El framework presentado puede aplicarse a fusión de datos numéricos y para fusión de información simbólica (descripción del mundo en términos de objetos, relaciones y eventos). En el caso de la fusión de datos numéricos se pueden utilizar técnicas de la teoría de la estimación⁶. En el caso de la información simbólica, los mecanismos computacionales utilizados refieren a técnicas de inteligencia artificial.

3.1.1. Framework general para el modelado dinámico del mundo

La fusión de mediciones de los sensores implica utilizar algoritmos más complejos a diferencia de cuando se utiliza un único sensor. Primero, porque los ambientes con varios sensores incluidos brindan mediciones de diferentes tipos y por lo tanto se necesita un procesamiento sobre éstas para uniformizar las unidades. Segundo, porque se necesitan estrategias para combinar las mediciones. Estos métodos pueden variar desde una simple intersección de valores, operaciones lógicas hasta métodos más complejos como fusión mediante mínimos cuadrados no lineales, estimaciones mediante probabilidades, etc. A pesar de lo anterior, la fusión de sensores provee redundancia en los datos obtenidos por lo que se toleran de mejor forma las posibles fallas de los sensores y permiten recuperar mediciones perdidas[4].

En la figura 7 se ilustra un framework para el modelado dinámico del mundo. En este framework, observaciones independientes son “transformadas” en un espacio de coordenadas y vocabulario común. Posteriormente, estas observaciones son integradas (fusionadas) en un modelo (descripción interna) por un proceso cíclico compuesto de tres fases: *Predicción*, *Correspondencia* y *Actualización*.

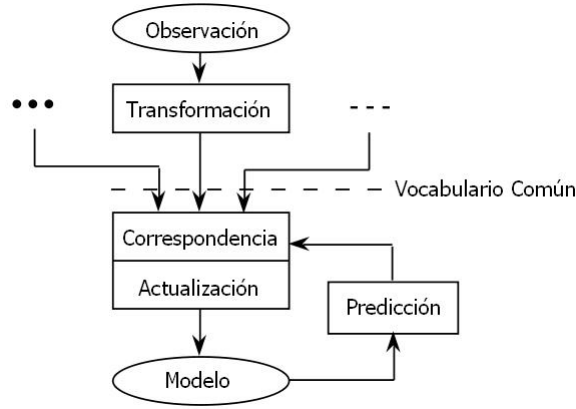


Figura 7: Un modelo para el modelado dinámico del ambiente[3].

Predicción: en esta etapa, se utiliza el estado actual del modelo para predecir el estado del mundo en el momento que se realiza la siguiente medición.

Correspondencia: etapa en la que se corresponden las mediciones transformadas con las estimaciones. Para corresponder las predicciones y las últimas mediciones se debe contar con datos cualitativamente similares; para esto existe la etapa *Transformación*, para llevar las mediciones al mismo espacio de coordenadas y a un vocabulario común.

Actualización: la etapa de actualización sirve para agregar nueva información al modelo, así como quitar la información “antigua”. Durante esta fase, son eliminadas del modelo la información que no es el “foco de atención” del sistema, así como la información que se entiende como errónea. Este proceso de eliminar los datos antiguos es necesario para prevenir que el modelo interno crezca de forma no acotada.

En [3] se identifican un conjunto de principios para integrar información perceptual, basados en la experiencia de construcción de sistemas utilizando este framework. Estos principios se derivan directamente de la naturaleza ciclica del proceso del modelado dinámico del mundo. A continuación se describen en detalle estos principios.

Principios para sensor fusion

Principio 1) Las primitivas en modelo del mundo deben ser expresadas como un conjunto de propiedades. Una primitiva del modelo expresa una asociación de propiedades que describen el estado de alguna parte del mundo. Esta asociación está basada típicamente en la posición espacial. Por ejemplo, la co-ocurrencia de una superficie con cierto vector normal, un color amarillo o cierta temperatura. Para valores numéricos, cada

⁶Rama de la estadística que se encarga de la estimación de parámetros basado en datos empíricos.

propiedad puede ser una estimación adjunta a la precisión. Para entidades simbólicas, la propiedad puede ser una lista de posibles valores de un vocabulario finito. Esta asociación de propiedades es conocida como el “vector de estado” en la teoría de la estimación.

Principio 2) Las observaciones y el modelo deberían ser expresadas en el mismo sistema de coordenadas. Para poder corresponder una observación con el modelo, la observación debe estar “registrada” con el modelo. Esto típicamente involucra transformar las observaciones sensadas, implicando tener un modelo confiable de la geometría y función del sensor.

El sistema de coordenadas común puede ser fijo en la escena o en el observador. La elección del marco de referencia debe determinarse considerando el costo total de las transformaciones involucradas en cada ciclo predicción-correspondencia-actualización. Por ejemplo, en el caso de un único observador estacionario, es más computacionalmente económico transformar el modelo a las coordenadas del sensor actual en cada ciclo de modelado. Por otro lado, cuando el modelo es grande comparado con la cantidad de observaciones, utilizar un sistema de coordenadas fijo en la escena podría implicar realizar una menor cantidad de cálculos.

Las transformaciones entre marcos de coordenadas generalmente requieren un modelo preciso del proceso de sensado. Esta descripción, comúnmente llamada “modelo sensorial”, es esencial para transformar una predicción en coordenadas de observaciones, o para transformar una observación en un sistema de coordenadas basado en el modelo. Determinar y mantener los parámetros de este “modelo sensorial” es un problema importante a tratar para un correcto funcionamiento de *sensor fusion*.

Principio 3) Las observaciones y el modelo deberían ser expresadas utilizando un vocabulario común. Un modelo perceptual puede ser pensado como una base de datos. Cada elemento de la base de datos es una colección de propiedades asociadas. Si se desea corresponder o agregar información al modelo, una observación debe ser transformada en términos de la base de datos, de forma de poder almacenarlas correctamente.

Una forma eficiente de integrar información de diferentes sensores es definir un elemento “primitiva” común, compuesto por diferentes propiedades las cuales pueden ser observadas o inferidas desde diferentes sensores. Un sensor puede brindar observaciones para un subconjunto de estas propiedades. Transformar las observaciones a un vocabulario común permite que el proceso de fusión ocurra independientemente de las fuentes de observaciones.

Principio 4) Las propiedades deben incluir una representación explícita de la incertidumbre. El modelado del mundo involucra dos tipos de incertidumbre: precisión y confianza. La precisión puede pensarse como una forma de incertidumbre espacial. Detallando explícitamente la precisión de una propiedad observada, el sistema puede determinar la extensión en la cual la observación está proveyendo nueva información al modelo.

Principio 5) Las primitivas deben ser acompañadas por un factor de confianza. Las primitivas del modelo nunca son ciertas; siempre deben ser consideradas como hipótesis. En aras de tener un mejor manejo de estas hipótesis, cada primitiva debería incluir un estimativo de la probabilidad de su existencia. Esto puede implementarse utilizando un factor de confianza en el rango $[-1, 1]$, una probabilidad, o incluso un estado simbólico de un conjunto de estados predeterminados.

Un factor de confianza provee al modelado dinámico del mundo un sistema de razonamiento no-monótono. Las observaciones que no se corresponden con las expectativas pueden ser consideradas inicialmente como inciertas. Si se recibe una confirmación de una observación posterior, su factor de confianza se incrementa. Si no se recibe confirmación, la observación puede ser descartada.

La aplicación de estos principios lleva a desarrollar un conjunto de técnicas para el proceso del modelado dinámico del mundo. En la siguiente sección se describen técnicas que pueden utilizarse en las distintas fases del proceso para la fusión de propiedades numéricas.

3.1.2. Técnicas para fusión de datos numéricos

En el caso de las propiedades numéricas, representadas por una primitiva compuesta por un vector de estimaciones de propiedades y sus precisiones, existe un conjunto bien definido de técnicas para cada fase del proceso del modelado dinámico del mundo. En [3] se muestra que las ecuaciones de predicción del filtro de Kalman⁷ proveen los medios para *predecir* el estado del modelo, mientras la distancia Mahalanobis⁸ provee una medida simple para la fase de *correspondencia*, y las ecuaciones de actualización del filtro de Kalman proveen un mecanismo para *actualizar* las estimaciones de las propiedades en el modelo.

⁷ Algoritmo que sirve para identificar el estado no medible de un sistema dinámico lineal sometido a ruido blanco[6].

⁸ De la estadística: medida de distancia que sirve para determinar la similitud entre dos variables aleatorias multidimensionales.

3.2. Sensor Fusion orientado a comportamiento

En los primeros desarrollos de sistemas reactivos se utilizaron robots con pocos sensores sencillos (por ejemplo un sonar o un anillo de sonares para distancias y una cámara para color, textura y ayuda al movimiento), lo que llevó a una filosofía de un sensor por comportamiento. Los comportamientos podían compartir flujos de sensores, pero sin estar enterados de ello. Esta filosofía llevo a un enfoque de *sensor fusion*, en que la fusión a nivel de comportamiento sería una fantasía. Por el contrario, *sensor fusion* era básicamente la combinación de distintas instancias del mismo comportamiento, cada uno utilizando distintos sensores. De hecho, este proceso es una simple competencia entre los distintos comportamientos generados por las distintas instancias. A esta fusión de comportamientos se le denominó *Sensor Fission*. Este nombre surge de conceptos de física nuclear: la fusión en la cual se crea energía al fusionar dos núcleos atómicos, mientras que en la fisión, se crea energía separando el núcleo atómico en dos. La figura 8 muestra un diagrama de sensor fission.

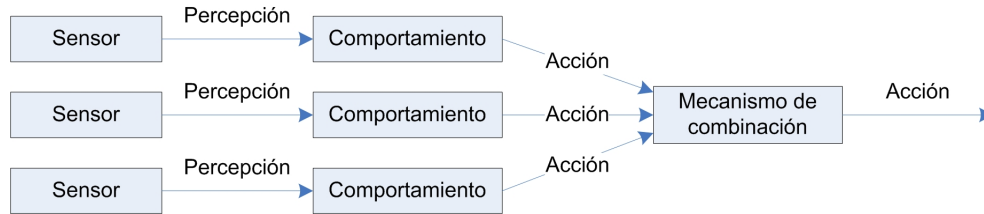


Figura 8: Diagrama de flujo de datos de Sensor Fission[5]

Otro tipo de fusión de sensores que puede ser visto en los animales es el *sensor fusion* orientado a acciones. Por ejemplo, si un gato oye un sonido y ve un movimiento, reaccionará con mayor firmeza que si percibe un solo estímulo. Este tipo de *sensor fusion* se le llama orientado a acciones para enfatizar que los datos de sensores están siendo transformados de forma de soportar una determinada acción específica y no para construir un modelo del mundo. En la figura 9 se muestra un diagrama un diagrama del flujo de datos de este tipo de *sensor fusion*.

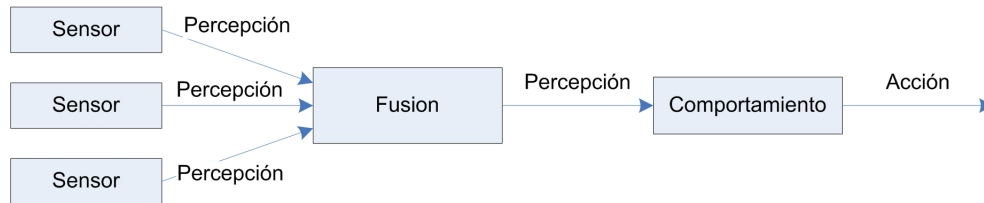


Figura 9: Diagrama de flujo de datos de *Sensor Fusion*[5]

El último tipo de fusión de sensores que se presentará es el denominado sensor fashion (moda de sensores en inglés). Este tipo de *sensor fusion* intenta transmitir con su nombre que el robot cambia los sensores ante cambios de circunstancias, así como las personas cambian el estilo de ropa ante los cambios de temporada. El diagrama de flujo de datos de sensor fashion se puede ver en la figura 10.

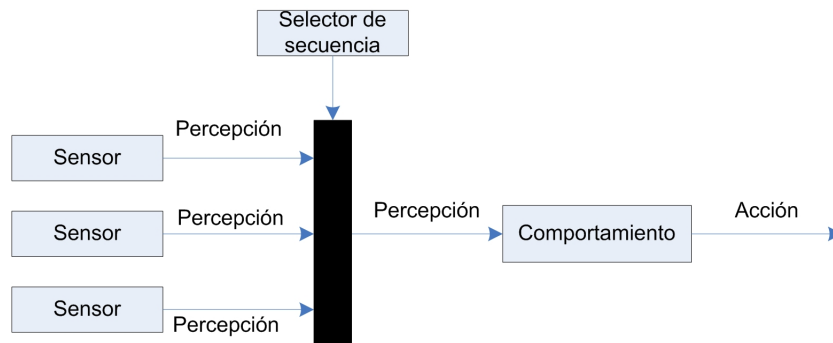


Figura 10: Diagrama de flujo de datos de Sensor Fashion[5]

Sensor fission, sensor fusion orientado a acciones y sensor fashion cubren los tipos de sensado *competitivo, complementario y coordinado* respectivamente.

Referencias

- [1] John Anderson and Jacky Baltes. A pragmatic global vision system for educational robotics. In *Robots and Robot Venues: Resources for AI Education*, AAAI Spring Symposium Series, pages 1–6, Stanford, CA, March 2007.
- [2] Thomas Bräunl. *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*. Springer, July 2006.
- [3] J. Crowley and Y. Demazeau. Principles and techniques for sensor data fusion, 1993.
- [4] J. Gu, M. Meng, A. Cook, and P.X. Liu. Sensor fusion in mobile robot: some perspectives. In *Proc. 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 1194–1199 vol.2, 2002.
- [5] Robin R. Murphy. *Introduction to AI Robotics*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2000.
- [6] Greg Welch and Gary Bishop. An introduction to the kalman filter. Technical report, University of North Carolina at Chapel Hill, 2004.