

Estimación de trayectoria a partir de imágenes RGB-D para un robot móvil autónomo

Sergio Alvarado Ramos

Tutor: Dr. Marco Antonio Negrete Villanueva

Índice general

1. Introducción	5
1.1. Motivación	6
1.2. Planteamiento del problema	6
1.3. Hipótesis	6
1.4. Objetivos	6
1.5. Descripción de documento	6
2. Antecedentes	7
2.1. Robots móviles autónomos	7
2.1.1. Locomoción	8
2.1.2. Componentes básicos	11
2.2. Conceptos básicos de visión artificial	13
2.3. Control de robots móviles	13
2.4. La plataforma ROS	13
3. Sistema de visión para estimación de trayectoria	15
4. Diseño y construcción de la base móvil	17
5. Sistema de control de posición	19
6. Integración mediante la plataforma ROS	21
7. Resultados	23
8. Discusión	25
8.1. Conclusiones	25
8.2. Trabajo futuro	25

Capítulo 1

Introducción

Los robots autónomos son importantes debido a que en un futuro podrán ser usados en tareas peligrosas o difíciles de realizar para un humano como: exploración planetaria, patrullaje, rescate de emergencia, intervención en ambientes extremos, construcción, medicina, etc [3]. Estos pueden facilitar nuestra vida y mejorarla.

Los robots móviles autónomos son posibles gracias a que en los últimos años se han tenido avances en el poder de computo, algoritmos para procesamiento de señales y toma de decisiones. Sin embargo existen retos para que los robots autónomos operen correctamente, estos retos son: locomoción, percepción, cognición y navegación[3, 4].

La locomoción, es la forma en la que nuestro robot se va a mover, aquí entra el diseño del robot (puede moverse por llantas, hélices, caminar, entre muchas otras opciones), además del diseño para lograr una correcta locomoción es necesario implementar algoritmos de control apoyados de conocimientos de mecánica, cinemática y dinámica para alcanzar nuestra posición o velocidad objetivo, estos pueden variar dependiendo de la estabilidad, la velocidad de respuesta, amortiguamiento, el costo etc.

En esta parte, poner algunos párrafos que contextualicen el problema. Puedes empezar con:

En los últimos años, los robots móviles autónomos han experimentado un gran avance debido al desarrollo tanto del poder de cómputo como de los algoritmos para el procesamiento de señales y toma de decisiones.

Puedes sacar información sobre la importancia de los robots móviles hoy en día en las introducciones de estos trabajos:

- <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881419839596>
- <https://mitpress.mit.edu/books/introduction-autonomous-mobile-robots-second-edition>

Si no puedes ver alguna de las referencias, me dices para pasarte el PDF. También puedes buscar en google scholar artículos o libros que mencionen algo sobre la importancia de los robots móviles autónomos

1.1. Motivación

Aquí debes desarrollar la idea de que la visión artificial es una de las partes más importantes de los robots. Te pueden servir estas referencias:

- https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-20144-8?fbclid=IwAR1QifVIim-6-_cU1ORouFtWoXkaZLr-RFjabVg8z1D605IU0vuJyNB2vBA
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319304719>

1.2. Planteamiento del problema

en esta parte va lo que ya hiciste en el protocolo. Quizá más adelante lo modifiquemos. Quizá esté bien agregar una figura donde se vea lo que se quiere hacer: un robot que atrape objetos que se le lancen en tiro parabólico.

1.3. Hipotésis

Aquí, plantea los objetivos del protocolo, pero en forma de supuesto, por ejemplo, para el primer objetivo, podrías poner algo como:

- Es posible desarrollar un sistema de estimación de trayectoria a partir de imágenes RGB-D lo suficientemente rápido para atrapar objetos lanzados en tiro parabólico.

1.4. Objetivos

Aquí van los mismos del protocolo

1.5. Descripción de documento

Esta parte la harás al final, pero quedará algo como: En el capítulo 2 se exponen los conceptos básicos que serán usados en el resto del documento y se presenta el trabajo relacionado. En el capítulo 3 se describe el sistema de visión implementado ...

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Robots móviles autónomos

La palabra robot viene de la palabra checa “robota”, esta palabra significa sirviente. El término robot se volvió popular en Praga en el año de 1921 con la obra R.U.R. de Karel Capek. La palabra robot hacia referencia a seres vivos humanoides, creados como sirvientes de los humanos, pero con el tiempo y con ayuda de la ciencia ficción, el término robot termino siendo usado para hablar de mecanismos que nos ayudan a hacer tareas. [2]

Los robots son capaces de percibir el mundo real por medio de sensores y pueden modificar su entorno por medio de manipuladores. [5] Actualmente, existen robots industriales que son muy útiles para realizar tareas repetitivas y/o de gran precisión, además son muy veloces, gracias a estas cualidades los teléfonos inteligentes y las computadores portátiles son posibles. Sin embargo estos robots tienen una gran desventaja que es la falta de movilidad, pueden realizar tareas asombrosas pero solo en un espacio limitado. [4]

La Valle [1] afirma que:

“La robótica es la automatización de sistemas mecánicos, que tienen sensores, actuadores y capacidades de computación”

Estos sistemas también son llamados sistemas autónomos. Algo fundamental para que funcionen correctamente es tener algoritmos que conviertan tareas de alto nivel para los humanos en descripciones de movimiento de bajo nivel.

[1]Ejemplo: la instrucción de pasar un vaso de agua se puede dividir en reconocer el vaso, llevar a cabo el movimiento para sostener el vaso sin que caiga, llevar el vaso de un punto A, que es donde se encontraba el vaso, a un punto B, el cual es el destino de interés.

Murphy [2] nos define a un robot móvil autónomo como:

“Aquel mecanismo capaz de cambiar su posición en el espacio sin la intervención de un operador humano.”

El primer gran reto en la creación de robots móviles autónomos es la locomoción. ¿Cómo debe moverse nuestro robot? Para resolver esta pregunta quién desee crear un robot móvil debe tener conocimientos de mecánica, cinemática, dinámica y teoría de control. [4]

Los siguientes problemas son percepción, localización y navegación. La percepción se refiere a que nuestro robot debe ser capaz de percibir el mundo real, este problema se resuelve con el uso de sensores y siendo más específico en esta tesis usaremos la visión artificial para lograr este objetivo. La localización y navegación van de la mano, ya que necesitamos saber en donde se encuentra nuestro robot para planear la trayectoria de un punto A a un punto B, es necesario tener conocimiento de algoritmos de computadora, teoría de la información, inteligencia artificial y teoría de probabilidad.[1, 2, 4]

La teoría de control clásica se enfoca en estabilizar un sistema (mecánico, eléctrico, hidráulico, térmico, etc) por medio de la retroalimentación del error, además el control óptimo puede enfocarse en minimizar el consumo de energía, tiempo de respuesta, sobrepaso u algún otro parámetro. Sin embargo, en la de teoría de control más moderna encontramos el término motion planning o planeación de movimiento. La planeación de movimiento es la construcción de entradas en un sistema dinámico que conduce de un estado inicial a un estado meta por medio de algoritmos. [1]

Un párrafo con una descripción general de todo lo que requiere un robot móvil autónomo: planeación de movimientos, control de bajo nivel, visión artificial. Terminar enfatizando que tu tesis se centra en la parte de control y visión artificial.

En esta parte presenta una varias definiciones de lo que es un robot móvil autónomo. Puedes sacar información de las introducciones de los siguientes trabajos:

- <https://mitpress.mit.edu/books/introduction-ai-robotics-second-edition>
- <https://mitpress.mit.edu/books/introduction-autonomous-mobile-robots-second-edition>
- <http://lavalle.pl/planning/>
- <https://mitpress.mit.edu/books/probabilistic-robotics>

2.1.1. Locomoción

Un robot necesita mecanismos de locomoción que le permitan moverse a través del ambiente. Existe una gran variedad de diseños e investigaciones de robots que pueden caminar, saltar, volar, nadar, arrastrarse, deslizarse, la mayoría de estos han sido inspirados en sistemas biológicos que se encuentran en la naturaleza (animales). Una importante excepción a los mecanismos de locomoción inspirados en la naturaleza es la rueda, la rueda es un invento humano, extremadamente eficiente al moverse en superficies planas.

Profundizando en los tipos de movimiento en animales, ¿cuál es la física detrás de estos? Tenemos por ejemplo el arrastre de insectos como las orugas,

el movimiento se produce por vibración longitudinal y se presenta una resistencia al movimiento debido a la fuerza de fricción. Otro ejemplo interesante es el deslizamiento de las serpientes este movimiento es producido por vibración transversal y también presenta resistencia por la fuerza de fricción. También existen animales que alcanzan grandes velocidades como es el caso del guepardo, el animal más veloz del planeta, cuyas patas se asemejan a un péndulo doble, el movimiento es producido por la oscilación de los péndulos, el movimiento presenta resistencia por la pérdida de energía cinética.

Los mecanismos de locomoción biológicos han funcionado muy bien en entornos extremos, sin embargo es difícil replicar su funcionamiento artificialmente, hasta ahora no hemos podido igualar el almacenamiento de energía, tiempo de respuesta y conversión de energía de los sistemas biológicos, además de que manufacturar sistemas similares actualmente resulta muy costoso, por estas razones es más común usar ruedas o un número reducido de piernas articuladas en la construcción de robots.

Los robots con piernas tienen ventaja sobre los robots con ruedas en terrenos difíciles. Pueden evadir hoyos y adaptarse al terreno fácilmente, tienen una gran ventaja manipulando objetos, y como ejemplo podemos observar al escarabajo pelotero, es capaz de mover una pelota más grande que él mientras se mueve con sus patas. Sin embargo en general, la locomoción de piernas requiere más grados de libertad y por lo tanto es más complejo que el uso de ruedas. Además, otro reto es el balance ya que las piernas no están en contacto con la superficie todo el tiempo.

Las ruedas han sido por mucho el mecanismo de locomoción más común en robots móviles y vehículos fabricados por el hombre. Existen 4 tipos de ruedas: Estándar, castor, sueca y esférica. Escoger un tipo de rueda está ligado a la geometría de las ruedas. Hay 3 características fundamentales al escoger el tipo de llanta y geometría, estas son controlabilidad, maniobrabilidad y estabilidad.

La estabilidad en robots móviles es garantizar que no haya tambaleo en el robot. El balance no suele ser un problema debido a que las ruedas tienen contacto todo el tiempo con la superficie. Se garantiza estabilidad con 3 ruedas, aunque se puede tener estabilidad con 2 ruedas, cuando se tienen 4 ruedas se requiere un sistema de suspensión que mantenga todas las ruedas en la superficie en terrenos que no son uniformes.

La maniobrabilidad es que tan sencillo es mover al robot en diferentes direcciones, la mayor maniobrabilidad se da cuando el robot es omnidireccional (puede moverse en cualquier dirección x , y en el plano). Es común usar ruedas suecas o esféricas para lograr esto.

Controlabilidad, recordando la teoría de control clásico es la propiedad de un sistema de ir de un estado A a un estado B, en el caso de los robots móviles los estados pueden ser las magnitudes físicas velocidad, aceleración y posición. La controlabilidad suele tener una correlación inversa con la maniobrabilidad, por lo tanto entre más controlable es el sistema, es menos maniobrable y viceversa. Debido a la correlación inversa no se pueden maximizar las 3 propiedades, es por eso que se debe elegir la geometría y tipo de rueda de acuerdo a la aplicación del robot.

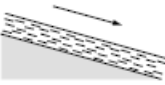
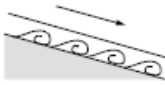

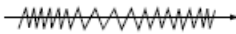

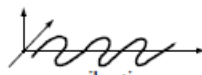






Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel 	Hydrodynamic forces	Eddies 
Crawl 	Friction forces	Longitudinal vibration 
Sliding 	Friction forces	Transverse vibration 
Running 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Jumping 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Walking 	Gravitational forces	Rolling of a polygon (see figure 2.2) 

Figura 2.1: Tipos de movimiento

Aquí vas a hablar de los diferentes tipos de locomoción que puede tener un robot móvil: con ruedas, orugas, piernas, etc. Puedes obtener información del capítulo 2 de <https://mitpress.mit.edu/books/introduction-autonomous-mobile-robots-second-edition>

Después vas a hablar específicamente de los robots con ruedas.

Después vas a hablar específicamente de los robots omnidireccionales con tres ruedas sobre una base circular.

2.1.2. Componentes básicos

En el pasado era difícil la creación de robots debido a lo lentas, pesadas y costosas que eran las computadoras con las que se llevaba a cabo el control del robot. Actualmente contamos con sistemas embebidos que son pequeños, ligeros, rápidos y no muy costosos los cuales sirven para controlar a nuestros robots. En el diseño de este robot móvil se usa una NVIDIA Jetson Nano con 4 GB de memoria RAM, la cual cuenta con un sistema operativo Linux.

La Jetson Nano requiere una fuente de energía de 5V con una corriente de al menos 3A, y puede ser suministrada por el puerto USB Micro-B o por una entrada Jack.

Especificaciones técnicas	
GPU	128-core NVIDIA Maxwell™
CPU	Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz
Memoria	4GB 64-bit LPDDR4 25.6GB/s
Almacenamiento	Entrada microSD
Conectividad	Gigabit Ethernet, M.2 Key E
USB	4x USB 3.0, 1x USB 2.0 Micro-B
Otros	40 pines (GPIO, I2C, I2S, SPI, UART)
	12 pines (Energía y señales relacionadas, UART)
Medidas	100 mm x 80 mm x 29 mm

Cuadro 2.1: Especificaciones NVIDIA Jetson Nano Developer Kit

El CPU (Unidad Central de Procesamiento) es el corazón de todos los sistemas embebidos, en el CPU se encuentra la ALU (Unidad Lógica Aritmética) y la CU (Unidad de control). La ALU se encarga de llevar a cabo todas las operaciones como suma, resta multiplicación, división, compuertas or, not, and, xor entre otras. La Unidad de Control, se encarga de la secuencia en las instrucciones, cada que llega un pulso de reloj recorre el registro en memoria, la información de ese registro es enviada a la unidad lógica aritmética y se llevan a cabo las operaciones necesarias.

Dependiendo de la aplicación los sistemas embebidos pueden utilizar desde un simple programa sin sistema operativo hasta un sistema operativo complejo como es el caso de Linux. La Jetson nano usada en el diseño cuenta con un sistema operativo Linux, la distribución que usamos es Ubuntu 18, con ligeras modificaciones hechas por la misma NVIDIA para su uso en la Jetson. Linux

nos provee de una gran cantidad de herramientas como lo es la interfaz gráfica, programación en lenguajes como Python o C++ y todo el software creado para este sistema operativo, siendo ROS (Robot Operating System) el más útil para nuestro robot.

Los sensores son muy importantes para que el robot pueda percibir el mundo, pero además de los sensores encargados de proporcionarnos datos para interpretar el entorno, también contamos con otros sensores.

Podemos clasificar los sensores como locales, globales, internos, externos, activos y pasivos.

Los sensores locales son aquellos sensores embebidos en el robot, mientras que los sensores globales son aquellos que transmiten datos al robot pero se encuentran montados fuera del robot. Los sensores internos se encargan de vigilar los estados internos del robot, mientras que los sensores externos perciben el entorno. Los sensores pasivos son aquellos que entregan la información del ambiente sin alterarlo, mientras que los sensores activos estimulan el ambiente para poder realizar mediciones, por ejemplo sensor de onda, escáner.

Como es de nuestro interés atrapar un objeto haciendo la segmentación de color, el sensor que usaremos es una cámara de profundidad D345i de Intel, que nos entrega información de la imagen RGB, así como la distancia a la que se encuentran los píxeles.

La tecnología RGB-D presenta el mismo funcionamiento que el famoso Kinect de Microsoft, esto consiste en un proyector y 2 cámaras. Patrones de luz infrarroja son emitidos por el proyector. Las cámaras ubicadas a la derecha e izquierda del proyector capturan la imagen y mandan la información a un procesador de imágenes de profundidad que obtiene los valores de profundidad de cada pixel con la correlación de las imágenes tomadas por ambas cámaras. La cámara RGB obtiene la información del color en la imagen y se puede alinear con la imagen de profundidad estimando parámetros.

Especificaciones técnicas	
Velocidad max. cámara RGB	30 cuadros por segundo
Velocidad max. cámara profundidad	90 cuadros por segundo
Rango ideal	0.3 m-3 m
Conexión	USB-C 3.1
Medidas	90 mm x 25 mm x 25 mm

Cuadro 2.2: Especificaciones Intel Cámara de profundidad D345i

Recordando las clasificaciones la cámara D345i es un sensor global, externo y activo.

Otro sensor que usamos es el encoder, este es necesario para poder controlar nuestros motores. El servomotor MX-12W usado en la construcción de este robot cuenta con un sensor de posición magnética AS5045. Este sensor tiene 4096 posiciones por revolución por lo que nuestra resolución es $360^\circ/4096=0.08789^\circ$. Un encoder magnético usa el efecto Hall, el movimiento de imanes y la rotación

del motor para entregarnos señales de pulsos con las cuales podemos saber hacia donde gira el motor, su velocidad y/o posición. El sensor es inmune a los campos magnéticos externos. Recordando la clasificación es un sensor local, interno y pasivo.

Como actuadores en el diseño contamos con servomotores Dynamixel MX-12W los cuales cuentan con un procesador ARM Cortex-M3, control PID. Los servomotores son motores de DC que contienen una parte electrónica encapsulada encargada del control de su posición o en este caso velocidad. A diferencia de la mayoría de los servomotores que son controlados por una señal PWM los servomotores que usamos se comunican por medio de un protocolo, mandando tramas de datos. Nosotros usamos el llamado protocolo 1.0. En este protocolo tenemos 2 tipos de paquetes de datos, el paquete de instrucciones (es enviado del controlador a los servos) y el paquete de estados (es la respuesta de los servos al controlador).

Especificaciones técnicas	
Tasa de baudios	8,000 [bps] 4.5 [Mbps]
Voltaje de entrada	10-14.8V
Medidas	32 mm x 50 mm x 40 mm

Cuadro 2.3: Especificaciones Dynamixel MX-12W

Aquí vas a hablar sobre los componentes básicos de un robot móvil autónomo: sensores, actuadores y procesadores, haciendo énfasis en los que tendrá tu robot. Puedes sacar info de <https://www.springer.com/gp/book/9783540343196> No es necesario algo tan extenso, porque la descripción en extenso del hardware se hará en el cap 4

2.2. Conceptos básicos de visión artificial

2.3. Control de robots móviles

2.4. La plataforma ROS

Capítulo 3

Sistema de visión para estimación de trayectoria

Capítulo 4

Diseño y construcción de la base móvil

Capítulo 5

Sistema de control de posición

Capítulo 6

Integración mediante la plataforma ROS

Capítulo 7

Resultados

Capítulo 8

Discusión

8.1. Conclusiones

8.2. Trabajo futuro

Bibliografía

- [1] S. M. LaValle. *Planning algorithms*. Cambridge university press, 2006.
- [2] R. R. Murphy. *Introduction to AI robotics*. MIT press, 2019.
- [3] F. Rubio, F. Valero, and C. Llopis-Albert. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 2019.
- [4] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza. *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press, 2011.
- [5] S. Thrun. Probabilistic robotics. *Communications of the ACM*, 45(3):52–57, 2002.