



SEP

SEST

DGEST

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

TITULO DE LA INVESTIGACIÓN

ESTABILIZACIÓN DE UNA PLATAFORMA ACUÁTICA
MEDIANTE REFERENCIAS VISUALES ARTIFICIALES

REPORTE FINAL DE SABÁTICO

OPCIÓN 6: ESTADÍAS EN EL SECTOR PRODUCTIVO O
EN CENTROS DE INVESTIGACIÓN.

PERIODO: DEL 17 DE AGOSTO DEL 2009
AL 16 DE AGOSTO DEL 2010

P R E S E N T A

MAYRA PATRICIA GARDUÑO GAFFARE

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Antecedentes.....	1
1.2.	Objetivos del trabajo.....	2
1.3.	Planteamiento del problema	2
1.4.	Sumario del reporte	3
2.	TEORÍA Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	4
2.1.	Tipos de control servo visual.....	4
2.2.	Diseño básico de un sistema de control servo visual CSV	5
2.3.	Características y problemáticas de un sistema de visión para un CSV	7
2.4.	Métodos de seguimiento empleados	8
2.5.	Aplicaciones de control servo visual	11
3.	CASOS DE SOLUCIÓN ESTUDIADOS.....	15
4.	MÉTODO PROPUESTO	25
4.1.	Definición de características visuales utilizables.....	26
4.2.	Esquema de Servo Control Propuesto	27
4.3.	Matriz de Interacción.....	27
4.4.	Calibración de la Cámara.....	29
4.5.	Estimación de Profundidad.....	31
4.6.	Resultados.....	34
5.	CONCLUSIONES	41
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	41

1. Introducción

1.1. Antecedentes.

La arquitectura de un robot definirá la manera en que éste realizará acciones a partir de sus percepciones [Ollero, 07]. Suele suceder que la entrada de información perceptual de un robot móvil autónomo tiende a ser muy voluminosa, sin embargo para ciertas tareas tales como la navegación, es necesario que el robot reaccione rápidamente, por lo tanto, existe la necesidad de un modelo que permita relacionar las percepciones con las acciones de manera eficaz.

La llamada arquitectura clásica o enfoque clásico consiste en dividir dicha tarea en bloques, es decir, efectúa una tarea a la vez de manera secuencial, primero recibe las percepciones, después planifica las respuestas a dichas percepciones y por último ejecuta las acciones según el plan que se trazó [Russell, 96].

El uso de sensores de visión para efectuar tareas de navegación de forma autónoma plantea el tema de los sistemas de control con retroalimentación visual, en este tema de investigación confluyen principalmente dos disciplinas, la ingeniería de control y la visión por computadora.

Este tipo de procesos han sido utilizados con mucho éxito para solucionar los problemas de navegación los cuales pueden resumirse en tres pasos:

- Estimar la posición del robot en el entorno
- Determinar la relación entre la posición actual del robot con respecto a su destino
- Finalmente basándose en los anteriores, encontrar una ruta que lleve al robot a su destino

El primer punto es esencial en un modelo de navegación, la resolución de este va a llevar a la solución de los otros dos problemas. En el campo de la robótica a esta tarea se le conoce como problema de posicionamiento la cual consiste en determinar el lugar que ocupa el robot en el medio ambiente donde se desenvuelve. Lo anterior significa que el robot, como agente inteligente que se pretende que sea, debe tener una noción del espacio que lo rodea y de la posición que ocupa dentro de este con respecto a los elementos importantes que puedan coexistir con él, tales como muros, arboles, piedras, puertas.

Mediante el análisis de la literatura en posicionamiento de robots móviles, es evidente que no existe a la fecha una solución completa y confiable para éste problema. Las múltiples soluciones parciales que existen establecen sus propias restricciones basadas en las condiciones de la problemática en particular a resolver. Sin embargo, dentro de este cúmulo de soluciones podemos distinguir que un método se puede basar en mediciones de posición relativa o en mediciones de posición absoluta. El primer método, proporciona un estimado de la posición del robot con respecto a una posición inicial específica del mismo. Este grupo trabaja con sensores del tipo odométrico e inercial, por ejemplo.

Los métodos de posición absoluta, determinan la posición del robot con respecto a una referencia universal previamente establecida y ubicada en el entorno. Estas técnicas generalmente utilizan

sensores exteroceptivos como las cámaras o los telémetros y se apoyan en señales activas, marcas artificiales, marcas naturales o en correspondencia de modelos.

El caso estudiado en el presente trabajo es propiamente un problema de navegación el cual se solucionó resolviendo los tres pasos arriba mencionados. La localización de una plataforma acuática al momento de realizar una tarea se puede perder ante corrientes de agua y oleajes. La estabilidad de la plataforma acuática se logra entonces manteniendo al vehículo en una configuración fija de interés. Para ello se desarrolló una técnica de control servo visual que mediante la información proporcionada del ambiente, permita saber cuál es la localización del robot (plataforma acuática) para determinar si está en la posición deseada, y si no, llevarlo a ella.

El sistema de control servo visual desarrollado, está basado en marcas visuales artificiales, las cuales son utilizadas en ambientes no estructurados, ya que dichas marcas permiten tener puntos de referencia fijos y constantes para la localización del vehículo.

1.2. Objetivos del trabajo

El trabajo de investigación desarrollado trata de solucionar el problema de la estabilización de una plataforma que navega sobre superficies acuáticas. El objetivo es lograr mantener la plataforma en una posición y orientación determinadas ya que a partir de esta se requiere realizar una serie de mediciones. Considerando las fluctuaciones del agua (el oleaje y la corriente natural del agua), las cuales provocan poca estabilidad en la posición deseada, se planteó necesario el desarrollo de un sistema de control el cual se propuso fuese basado en visión.

A partir de este objetivo, el trabajo derivó dos objetivos particulares:

- 1) El desarrollo de un sistema de visión el cual permita extraer información visual del ambiente que sirva de retroalimentación para el sistema de control, y
- 2) el desarrollo de un sistema de control basado en dichas marcas visuales.

1.3. Planteamiento del problema

Dentro del marco del proyecto 906.08-P se desarrolló una plataforma acuática, construida para realizar el aforo de cuerpos de agua. Dicha plataforma está equipada con elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos para su desplazamiento y operatividad. Cuenta además con un sistema de medición el cual será el encargado de realizar diversas lecturas requeridas para aforar el área en cuestión.

La plataforma opera de forma guiada por un operador en tierra y su operación puede resumirse de la siguiente manera [Díaz, 09]:

1. Encender los propulsores del vehículo.
2. Posicionar el vehículo en un ancho Δw_i del cuerpo de agua.
3. Apagar los propulsores del vehículo.
4. Verificar la comunicación entre el vehículo y una computadora portátil ubicada en tierra.
5. Accionar el motor del ancla y detenerlos cuando ésta llegue al fondo del cuerpo de agua.

6. Accionar el motor del molinete, y comenzar a desplazarlo a una profundidad D_i .
7. Detener el motor del molinete y obtener las velocidades de flujo V_1 a la profundidad D_1 .
8. Enviar los datos recabados por el vehículo a la computadora portátil ubicada en tierra.
9. Verificada la información obtenida, accionar el motor del molinete y llevarlo a una segunda profundidad D_2 .
10. Detener el motor del molinete y obtener una segunda velocidad V_2 .
11. Verificar la información obtenida (se pueden realizar las operaciones 6 a 11 tantas veces se requiera, siempre y cuando sea sobre la misma vertical).
12. Terminadas las mediciones D_i y V_i , accionar el motor del molinete y llevarlo a su posición inicial.
13. Estando el molinete en su posición inicial desactivar el motor del molinete y activar el motor del ancla a fin de comenzar su ascenso.
14. Colocados tanto el molinete como el ancla en sus posiciones originales, accionar los propulsores del vehículo y llevarlo a otra distancia Δw_i .
15. Realizar de nuevo los pasos 3 a 14.

Como hemos mencionado, el operador conduce vía remota la plataforma a un punto deseado desde el cual el sistema de medición deberá realizar una serie de muestreos. El vehículo es fijado en esa posición por un lastre el cual permite su relativa sujeción al fondo del cuerpo de agua. Sin embargo, si bien el mecanismo de anclaje asegura la fijación de la nave en ese punto, este no asegura la estabilidad total. Dada la superficie de navegación, el vehículo se verá afectado en posición y orientación debido a la corriente natural del agua o a oleajes provocados por vientos o por el mismo sistema locomotor de la plataforma.

El problema entonces, se concretó en resolver las siguientes preguntas:

- Como detectar la orientación y posición de la plataforma cuando este ha sido anclado en un punto de medición.
- Como determinar la variación (error entre la posición actual y la posición deseada), en posición y orientación, de la plataforma debido a la inestabilidad de la superficie hídrica.
- Como traducir en comandos de control dicho error para que la posición y orientación de la plataforma sean corregidas durante la medición sobre un mismo punto.

Además, en la resolución de estas preguntas se consideró resolver un elemento central de los sistemas en tiempo real:

- Como generar las consignas apropiadas en un tiempo eficiente.

1.4. Sumario del reporte

El presente reporte está organizado en seis capítulos.

El capítulo 2 da una introducción a los elementos teóricos que ayudan a entender temas relacionados con la presente problemática. Se estudian además las actuales propuestas de

investigación y sus vertientes para solucionar el problema de la navegación basada en retroalimentación visual.

El capítulo tres, muestra tres casos de estudio los cuales fueron planteados inicialmente como posibles soluciones. Se analiza su diseño y su aplicación, y se discute porque estos métodos fueron descartados en función a sus desventajas.

El capítulo 4 presenta la descripción del método propuesto. En este se muestran los procesos y la combinación de técnicas empleadas en el desarrollo del proyecto. También se describen la configuración manejada, los parámetros usados y las razones que han llevado a disponer de esa configuración. El capítulo 5 muestran los resultados obtenidos y finalmente en el capítulo 6 se presenta la literatura de soporte.

2. Teoría y revisión del estado del arte

El sistema desarrollado en este trabajo, se enmarca dentro de la teoría llamada Control Servo Visual, CSV (en ingles *visual servo control*, VSC). El control servo visual concretamente consiste en el uso de datos provistos por un sistema de visión para controlar el movimiento de un robot. A partir de aquí se pueden distinguir dos tareas principales: una, el desarrollo de un sistema de visión y otra la implementación de un sistema de control. En esta sección, se abordarán de manera breve algunos de los temas relacionados con estas dos tareas. Cada una de estas tareas involucra no una, sino varias disciplinas, las cuales por sí mismas son un tema a estudiar. El objetivo de la revisión aquí presentada, es mostrar los conceptos básicos y dar un panorama de los desarrollos actuales que permitan ubicar en el estado del arte el trabajo aquí desarrollado.

2.1 Tipos de control servo visual.

Los principales esquemas empleados en un sistema de control servo visual son los basados en imagen, IBVSC por sus siglas en ingles de *Image Based Visual Servo Control*, o en posición, PBVSC de *Position Based Visual Servo Control*.

El control basado en posición utiliza la posición de la cámara respecto a las coordenadas de las referencias visuales. Calculando la posición a partir de un conjunto de mediciones de la imagen se requieren los parámetros intrínsecos de la cámara y el modelo 3D de los objetos observados y conocidos. Este es un problema clásico de visión llamado problema de localización 3D.

En un PBVSC la función de error de control es definida en el espacio cartesiano. Las características de los objetos son extraídas de la imagen y del modelo de la cámara. El objeto es usado para calcular su posición respecto a la cámara. La ventaja principal de este método es que, finalmente la cámara es controlada desde el espacio cartesiano y esto nos permite usar uno de los tantos controladores cartesiano que existen en la literatura. El esquema que muestra una estructura de control tipo PBVSC se muestra en la figura 1.

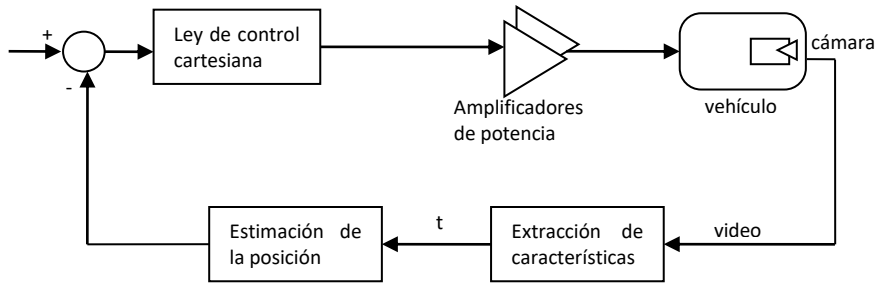


Figura 1. Estructura de un sistema de control servo visual basado en posición.

El control basado en la imagen utiliza las coordenadas en el plano imagen de un conjunto de puntos. Las mediciones de la imagen son usualmente las coordenadas de los pixeles de un conjunto de puntos de la imagen.

En un IBVSC la función de error del controlador está definida en el espacio imagen. Este método no requiere una calibración ni un modelo preciso dado que un esquema de lazo cerrado es realizado directamente en coordenadas imagen. Sin embargo, se debe considerar que en este esquema no hay controlabilidad de la configuración de la cámara en el espacio cartesiano, además de que la posición inicial y la posición deseada deben estar bastantes cercanas, de lo contrario, la estabilidad no estará garantizada y el objetivo puede quedar fuera del campo de visión. El esquema de un sistema basado en imagen se muestra en la figura 2.

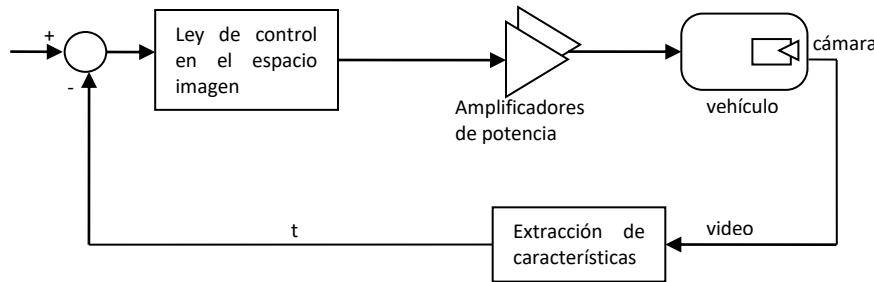


Figura 2. Estructura de un sistema de control servo visual basado en imagen.

2.2 Diseño básico de un sistema de control servo visual CSV

[Chaumette, 2006]

El objetivo de un proceso de control basado en visión es minimizar un error el cual puede ser definido por:

$$e(t) = s(m(t), a) - s^* \quad (1)$$

Donde:

$\mathbf{m}(t)$, es el vector que representa el conjunto de mediciones de una imagen. Estas mediciones se convierten en un vector de k características.

$\mathbf{a}$ es el conjunto de parámetros del sistema como por ejemplo los parámetros de la cámara o el modelo 3D de los objetos y

$\mathbf{s}^*$ es el vector que contiene los valores estimados de las características.

El esquema de un sistema de control visual cambia dependiendo como $\mathbf{s}$ es diseñada, es decir, cómo la información visual es presentada. Si $\mathbf{s}$ es un conjunto de características las cuales están disponibles en la imagen se trata de un sistema basado en la imagen. Pero si $\mathbf{s}$ consiste en un conjunto de parámetros 3D los cuales se estiman de las mediciones de la imagen entonces se trata de un sistema servo visual basado en posición (ver sección 2.1).

Obteniendo $\mathbf{s}$, el siguiente paso es determinar la relación entre la variación del tiempo en $\mathbf{s}$ y la velocidad de la cámara. Esto lo podemos determinar a partir de lo siguiente:

Sea $\mathbf{v}_c = (v_c, \omega_c)$ la velocidad espacial de la cámara, donde v_c es la velocidad lineal instantánea del origen del marco de la cámara y ω_c , la velocidad angular instantánea del marco de la cámara. La relación entonces entre $\dot{\mathbf{s}}$ y $\mathbf{v}_c$ esta dada por:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v}_c \quad (2)$$

donde $\mathbf{L}_s \in \mathbb{R}^{k \times 6}$ es la matriz de interacción relacionada con $\mathbf{s}$ (o *Jacobiano*).

De las ecuaciones (1) y (2) se obtiene la relación entre la velocidad de la cámara y la variación del error en el tiempo:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_e \mathbf{v}_c \quad (3)$$

donde $\mathbf{L}_e = \mathbf{L}_s$. Considerando $\mathbf{v}_c$ como la entrada al controlador del robot y buscando asegurar un decremento desacoplado exponencial del error se obtiene a partir de (3):

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \mathbf{L}_e^+ \mathbf{e} \quad (4)$$

Donde $\mathbf{L}_e^+ \in \mathbb{R}^{6 \times k}$ es seleccionada como la pseudo-inversa de $\mathbf{L}_e$, o sea $\mathbf{L}_e^+ = (\mathbf{L}_e^T \mathbf{L}_e)^{-1} \mathbf{L}_e^T$, si $\mathbf{L}_e$ es de rango completo 6. Esta elección permite que $\|\dot{\mathbf{e}} - \lambda \mathbf{L}_e^+ \mathbf{L}_e \mathbf{e}\|$ y $\|\mathbf{v}_p\|$ sean mínimas.

Dado que en un sistema real no es posible conocer perfectamente $\mathbf{L}_e$ ni $\mathbf{L}_e^+$, una aproximación o una estimación de una de estas dos matrices debe ser realizada (la cual puede ser representada por $\widehat{\mathbf{L}_e^+}$).

Empleando este cambio en la notación, la ley de control queda como:

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \widehat{\mathbf{L}_e^+} \mathbf{e} \quad (5)$$

2.3 Características y problemáticas principales de un sistema de Visión para un CSV.

Dentro de los sistemas de control servo visual se requiere primeramente diseñar un sistema de visión que mediante el tratamiento de la imagen extraiga la información visual que sirva de alimentación al sistema de control.

Los sistemas de visión manejan diversas variantes que los caracterizan. Esto puede basarse en el tipo y número de sensores a utilizar para la captura de la información, al tipo de características a extraer de un objeto de interés y a la configuración del sistema (ubicación de los sensores).

Revisando la literatura al respecto, se visualiza que la mayoría de los trabajos utilizan un sistema monocular para extraer la información visual del ambiente [Cid, 09], [Sattar, 09]. Los sistemas monoculares hacen uso de una sola cámara para realizar su tarea. Usualmente se monta una cámara en un robot móvil con su eje óptico paralelo al piso y los bordes verticales del medio ambiente pueden ser tomados como marcas distintivas, entonces el problema del posicionamiento del robot se convierte en un problema de tipo bidimensional. Si estas marcas pueden ser correctamente identificadas y su posición es conocida, entonces la orientación y posición del sensor óptico puede determinarse.

Otros trabajos optan por utilizar sistemas estereoscópicos [Meil, 09], [Iwatani, 08], es decir, se utilizan dos o más cámaras para proporcionar información del mundo real. Se puede utilizar un par de cámaras en estero para determinar la correspondencia entre las marcas observadas en un mapa precargado y estimar así la posición bidimensional del sensor a partir de esta correspondencia.

Como complemento a la información proporcionada por las cámaras es común la utilización de otro medio de percepción como un sistema laser por ejemplo, [Karras, 08], [Villalobos, 03]. A estos sistemas se les conoce como sistemas de luz estructurada, y se les considera activos ya que incorporan un haz de luz en el medio. Usando una cámara, es posible observar como es distorsionado el haz al proyectarse sobre los objetos del ambiente. Con esta técnica es posible la reconstrucción de escenas tridimensionales, el proceso es parecido a la estereovisión, sólo que en este enfoque se substituye una de las cámaras por un proyector de haz de luz y se usa la triangulación para encontrar la profundidad de los puntos proyectados por dicho patrón.

Para lograr el objetivo perseguido por la técnica de luz estructurada se necesita un tipo de luz con determinada forma, por ello, se emplea en la mayoría de los casos la luz laser. El láser, por sus características es una luz totalmente previsible, es decir, el parón no pierde su forma al ser proyectado a ciertas distancias, dependiendo esto directamente de la potencia del mismo.

La ubicación del, o los sensores, también puede variar. Generalmente se manejan dos estrategias, una, la cámara puede estar fija en el ambiente, u otra, la cámara puede ir montada en el robot mismo. En la primera, la cámara se ubica en una posición fija en el ambiente y visualiza desde ahí

tanto al robot como a su objetivo. Como se puede ver, en este esquema, el movimiento del robot no afecta la visualización del objeto, por lo que siempre se mantendrá en una posición fija en la imagen adquirida por la cámara. Esto puede no ser verdad si, como por ejemplo en nuestro caso, el objetivo se encuentre en el robot mismo. En esta estrategia, la cámara y el robot están referenciados a un sistema coordinado universal. Un ejemplo de este modelo se visualiza en [Iwatani, 08].

En el segundo caso se maneja una configuración llamada ojo en mano (eye-in-hand). Este término se deriva de los sistemas empleados en manipuladores donde la cámara se monta en el actuador final ("mano") del brazo. Es claro que en esta configuración los movimientos de la cámara y los del actuador final mantienen siempre una relación constante y conocida. Además, la visualización del objeto en la imagen de la cámara estará siempre ligada al movimiento del robot. Trabajos que usan esta técnica se encuentran en [Sattar, 05], [Karras08].

El proceso común en un sistema de control visual inicia con la adquisición de la información de la cual se extrae posteriormente mediante técnicas de visión, un conjunto de características que serán las encargadas de alimentar el sistema de control. El conjunto de características utilizadas es otra variante en un sistema. Dependiendo de las condiciones del problema en particular, se marca la conveniencia del tipo de característica a emplear.

El conjunto de características a seleccionar de una marca es otra variante en un sistema. Dependiendo de las condiciones del problema en particular, se marca la conveniencia del tipo de característica a emplear. En el campo de la visión, una característica es cualquier elemento estructural que puede ser extraído de una imagen, un segmento, una esquina, etc. Típicamente la característica de una imagen, corresponderá a la proyección de una característica física de algún objeto, dentro del plano imagen de la cámara. Un punto característico bueno, es aquel que puede ser ubicado sin ambigüedad desde diferentes vistas de la escena, como un hoyo en una pieza, o un patrón distintivo creado con este fin. Un parámetro característico en una imagen es cualquier cantidad real que pueda ser calculada de una o varias características de imágenes. Algunos parámetros usados para referenciar vehículos pueden ser por ejemplo, las coordenadas de puntos en el plano imagen [Sattar, 05], la longitud de un contorno [Rives 97], o bien la iluminancia de los objetos [Collewet, 08].

2.4 Métodos de seguimiento empleados.

Los sistemas de control servo visuales, se alimentan de la información provista por el sistema de visión, quien mediante un sensor (cámara), visualiza la escena y extrae dicha información. La información generalmente son objetos o características de objetos de interés usualmente llamadas marcas, que se encuentran en el ambiente. El sistema de control entonces realiza el ajuste de sus movimientos mediante la información obtenida del seguimiento de dichas marcas en una secuencia de imágenes. Este método es conocido en la literatura como: seguimiento visual (visual tracking).

El principal problema del seguimiento visual es qué hacer cuando un objeto de interés ya no es visualizado por la cámara o no es identificado correctamente. Esto sucede con frecuencia ya que el movimiento del sistema puede provocar que el objeto a seguir salga del campo de visión de la cámara o por otro lado que las condiciones ambientales no permitan una clara identificación y el objeto se pierda. El seguimiento de un objeto diferente dará entradas falsas al sistema de control y ocasionará errores de control críticos.

Iwatani y colaboradores [Iwatani, 2008] trata el problema de seguimiento visual derivado de la oclusión de los objetos. Ellos proponen un método el cual se basa en un algoritmo de control servo visual que integra la extracción y estimación de características de la imagen y el control a partir de ellas. La imagen Jacobiana es utilizada para la extracción y la estimación de las características de la imagen lo cual permite una baja complejidad computacional. El algoritmo propuesto trabaja con una imagen de características. Primero, las características de la imagen del tiempo k son extraídas usando una estimación de las características de la imagen al tiempo $k-1$. Posteriormente se realiza una selección, reduciendo al mínimo las características de la imagen y el estado del sistema es actualizado. Finalmente se calculan las entradas de control y se realiza una estimación de las características de la imagen.

Un segundo trabajo presenta un control servo visual que permite a un robot submarino seguir un objetivo deseado bajo el agua [Sattar, 05]. Este trabajo utiliza un controlador proporcional derivativo, el cual recibe como entradas dos señales de error provenientes del algoritmo de seguimiento para corregir la orientación e inclinación del navegado del robot bajo el agua. El trabajo describe claramente el sistema en dos partes: la metodología empleada para el sistema de seguimiento y el controlador de la navegación acuática.

El algoritmo de seguimiento utiliza el principio de un operador de regiones de interés. La región de interés en este caso está dada por una mancha de color la cual es detectada bajo ciertos parámetros dados como entrada al sistema. Se trabaja con los valores normalizados en el espacio de color RGB. Los valores se normalizan dividiendo cada pixel rojo, verde y azul entre la suma de cada valor individual. Se aplica un umbral sobre los valores absolutos con el propósito de eliminar las áreas oscuras de las regiones de interés. Los parámetros para detectar las regiones de interés se manejan también normalizados y son manualmente ajustados. A partir de la imagen segmentada se obtienen aquellos pixeles de interés aplicando un nuevo umbral.

El centro de masa de la marca de color es calculado y la masa total de la marca es utilizada como un factor de confianza. Si este factor está por debajo de un umbral fijado en función a las condiciones del experimento y el tipo de marca usada, entonces las mediciones obtenidas son desechadas.

Finalmente la señal de error está dada por la distancia euclidiana entre el centro de masa de la marca y el centro de la imagen. Dos señales de errores son usadas, una para la inclinación y otra para la orientación, dichas señales son usadas como entradas al controlador. El controlador toma las entradas del método de seguimiento y genera los comandos de inclinación (corrige el error en y), y orientación (corrige el error en x) para el control del navegado. Finalmente, a partir de las

entradas actuales y las entradas anteriores, el controlador genera los comandos a partir de la ley de control dada por:

$$\Delta = \omega_1 \bar{\epsilon}_t + \omega_2 \frac{\partial}{\partial t} \bar{\epsilon}_t \quad (6)$$

Donde $\bar{\epsilon}_t$ es el tiempo promedio de la señal de error al instante t y se define recursivamente por:

$$\bar{\epsilon}_t = \epsilon_t + \gamma \bar{\epsilon}_{t-1} \quad (7)$$

ϵ_t es la señal de error al instante t , ω_1 y ω_2 son la ganancia proporcional y diferencial respectivamente y γ es el error de propagación constante.

Sattar y colaboradores en un trabajo más reciente [Sattar, 09], presentan un nuevo método de seguimiento para el control servo visual bajo el agua. Lo novedoso de la técnica propuesta, es el empleo de algoritmos de maquinas de aprendizaje, como lo son los métodos Boosting. Específicamente los autores utilizan el algoritmo AdaBoost, el cual es un clasificador estadístico que consiste en usar un conjunto de clasificadores débiles para formar un clasificador fuerte, el cual es el que entrega la respuesta final del algoritmo. De esta manera el proceso comienza teniendo un gran número de filtros ajustados a las variaciones espaciales y cromáticas del ambiente bajo el agua. De estos, se realiza una selección de aquellos que muestran mejores expectativas para después aplicar el método AdaBoost sobre ellos. El proceso de entrenamiento asigna pesos a los aprendices débiles, en este caso, a los métodos de seguimiento visual bajos en carga computacional. La decisión final para la selección de los algoritmos de seguimiento visual está dada por el promedio ponderado de las salidas de cada método de seguimiento individual seleccionado por AdaBoost. El método propuesto está en vías de mejoras y de ser implementado sobre el robot para experimentaciones en tiempo real.

Un tercer trabajo presentado en [Nierobisch, 06], plantea una alternativa de solución al problema del seguimiento visual mediante la utilización de una cámara pan-tilt, es decir, con movimiento horizontal y vertical. La idea se basa en el amplio campo visual que se puede tener con la utilización de una cámara con movimiento. En el trabajo se considera que mediante un control predictivo del movimiento, se garantiza que las características de la imagen a seguir, permanecerán dentro del campo de visión de la cámara.

La dirección de la cámara es controlada independiente del movimiento tridimensional del robot lo cual permite que la cámara pueda seguir observando las marcas de interés a lo largo de distancias considerables y a pesar de la orientación del vehículo a lo largo de la trayectoria. El control independiente de ambos sistemas es logrado transformando las características observadas del plano imagen a un plano virtual de la cámara virtual.

Las ventajas planteadas del sistema son; el uso de pocas marcas visuales en el seguimiento de una trayectoria suave, la utilidad en ambientes restringidos (tipo corredor por ejemplo) en donde las marcas se encuentran lateralmente respecto a la dirección de la trayectoria del robot.

En trabajos anteriores se plantea facilitar el seguimiento de las marcas visuales mediante el uso de una cámara omnidireccional [Okamoto, 02]. La ventaja de un sistema omnidireccional es que provee un campo visual de 360°, lo cual permite observar cualquier punto de interés a partir de cualquier posición sin necesitar que la cámara realice movimiento alguno como en el caso del sistema planteado en [Nierobisch, 06].

2.5 Aplicaciones de control servo visual

El control visual ha sido de gran utilidad en el control de sistemas robotizados de diversa índole. Los casos más encontrados en la literatura son aquellos sistemas de control servo visual aplicados en robots manipuladores o brazos robóticos [Miura, 02], [Deguchi, 08], [Liu, 08], [Cid, 09], [Xiao, 09]. Dentro de los trabajos de gran importancia a destacar en la literatura son los reportados por Hutchinson y colaboradores. Ellos reportan entre otros, un tutorial que describe las diversas técnicas que han sido utilizadas con éxito en el uso de información visual para el control de la posición del efector final de un manipulador relativo a un objeto o características de interés [Corke, 93], [Hutchinson, 96]. Los sistemas presentados, buscan de manera general controlar mediante información visual provista por una o varias cámaras, fijas en el ambiente o montadas en el propio robot, la posición del efector final respecto a los objetos con el fin de manipular su ambiente. Como parte importante del tutorial se presenta una revisión general de diversos tópicos involucrados en un sistema servo visual. Se analizan conceptos fundamentales de visión como son el análisis de la formación de la imagen, la geometría de la misma y la transformación de coordenadas, así como algunos métodos de seguimiento visual (visual tracking), considerando que en un sistema de este tipo se requiere el seguimiento de características o índices visuales dentro de una secuencia de imágenes.

El control servo visual no es exclusivo de los robots manipuladores. Dentro del campo de la robótica móvil también se plantea de igual manera la necesidad de controlar la posición del robot respecto a un objetivo específico. En cuanto a este campo podemos hablar de robots terrestres, acuáticos y aéreos.

En [Petrielli, 07] se presenta un método cuyo objetivo es lograr que un robot móvil intercepte una pelota que se encuentra en movimiento dentro del área de trabajo del robot. El sistema desarrollado localiza al robot y a la pelota usando técnicas de segmentación por color. El robot es etiquetado con dos colores diferentes uno para detectar su posición y otro para la orientación. La pelota es identificada por medio de un color diferente a todos. El método de intersección identifica primeramente la trayectoria descrita por la pelota. Asumiendo que dicha trayectoria es una línea recta se aplica una regresión lineal para determinar la recta que mejor se aproxima a cuatro puntos medidos. Una vez que se conoce la trayectoria se deriva el punto de intersección y se mueve el robot hasta ese punto, para esto se utiliza un control en lazo cerrado.

Nierobish y colaboradores [Nierobish, 06], desarrollan un sistema de control servo visual basado en una cámara pan-tilt para desplazar un robot de un cuarto a otro con el objetivo de que el

propio móvil encuentre su estación de recarga. El sistema no requiere de un mapa geométrico del ambiente, este es conducido desde un cuarto inicial pasando por un corredor y entrando a un segundo cuarto en el cual se encuentra la estación de recarga. Para realizar la tarea antes descrita el sistema hace uso de siete marcas visuales distribuidas estratégicamente a lo largo del espacio a recorrer.

Un sistema servo visual híbrido para el control de la navegación de un robot móvil no holonómico, es presentado en [Zang, 09]. El trabajo considera un robot diferencial equipado con una cámara, el cual bajo la retroalimentación visual debe alcanzar una posición deseada. Para calcular la configuración relativa a partir de las imágenes se desarrolló un método de estimación del movimiento usando las correspondencias de puntos característicos entre la imagen actual y la imagen deseada. Dada la restricción del movimiento planar del robot, el trabajo demuestra que la información de movimiento puede ser directamente calculada usando únicamente tres puntos característicos. Además, el sistema obtiene ventajas de las restricciones del campo visual de la cámara y del problema de oclusión de los objetos considerando la propiedad de continuidad del movimiento. El sistema incorpora las ventajas de un sistema basado en posición (PBVS) y un sistema basado en la imagen (IBVS) definiendo el error como una combinación de las señales de la imagen y del ángulo de orientación.

El controlador propuesto es un controlador retroalimentado suavemente variante en el tiempo, el cual permite llevar al robot a la configuración deseada exponencialmente rápido y de manera independiente a la información de profundidad desconocida. La idea básica de la metodología es particionar el sistema global en dos subsistemas y generar una ley apropiada para cada uno de ellos, las cuales, se presume estabilizan el sistema de lazo cerrado.

El método propuesto manifiesta las siguientes aportaciones:

- Resuelve de manera exitosa el problema de los métodos basados en geometría epipolar y homografía.
- Las restricciones del campo visual de la cámara y el problema de oclusión son en gran parte resueltos ya que sólo tres puntos característicos son requeridos para la estimación de movimiento.
- El desarrollo de un sistema de error híbrido que permite hacer frente a las restricciones de no holonomía a pesar de la falta de la información de profundidad.

En los trabajos anteriores se desarrollan sistemas de control servo visual enfocados a robots terrestres, mencionamos ahora algunos trabajos de vehículos acuáticos y aéreos.

En la literatura, Hua y colaboradores [Hua, 09], describen los robots aéreos y acuáticos como dos cuerpos cuya similitud puede radicar en que ambos, al momento de navegar, se encuentran inmersos en un medio fluido, agua o aire, y pueden ser controlados ya sea vía una fuerza propulsiva a lo largo de un eje privilegiado del cuerpo, o mediante un vector de par con uno, dos o tres componentes independientes complementarios, encargados de modificar la orientación del cuerpo.

A pesar de estas similitudes estructurales es claro entender que existen importantes diferencias al momento de su operatividad. [Hua, 09] menciona por ejemplo, que un robot aéreo navega en el aire en un espacio tridimensional mientras que un barco se mueve sobre la superficie de agua lo cual puede considerarse un espacio 2D. Esta disimilitud produce fuerzas de reacción, aerodinámica o hidrodinámica según el caso, con magnitudes y propiedades diferentes. Además, se menciona que la gravedad no es compensada en el caso de un aeroplano, pero los efectos de la fuerza de elevación son más sistemáticos y preponderantes; los efectos de la masa adicional conciernen principalmente a los barcos, submarinos y dirigibles.

Sin embargo, en cualquier caso, aéreos o marítimos, la navegación visual es una herramienta útil para el control del movimiento. Varios desarrollos en este ámbito se encuentran en la literatura los cuales se encuadran dentro de los sistemas de control visual para vehículos no tripulados, EVs por sus siglas en inglés: Unmanned Vehicles.

La utilidad de los sistemas aéreos en aplicaciones civiles de supervisión e inspección han despertado un gran interés por el desarrollo de los mismos. En [Mejía, 06], se presenta un sistema servo visual para el control de un helicóptero que debe volar en ambientes urbanos estructurados de manera autónoma. La tarea a realizar, es que a partir de una posición de suspensión inicial arbitraria cercana a un edificio, el helicóptero sea capaz de realizar el seguimiento de las marcas visuales (en este caso las ventanas del edificio), y alinearse con respecto a ellas. Las ventanas son descritas por sus cuatro esquinas por lo que la tarea del sistema visual se resume en la detección y el seguimiento de cuatro puntos. El sistema servo visual es quien envía los comandos de navegación al controlador del helicóptero quien es el responsable de la autonomía del vehículo. El regulador de vuelo se basa en controlador PID desacoplado y cada grado de libertad es controlado de manera independiente considerando que la dinámica de un helicóptero es desacoplada.

El control servo visual para un vehículo aéreo no tripulado de despegue y aterrizado vertical, llamado VTOL-UAV por Vertical Takeoff and Landing Unmanned Aerial Vehicle, es presentado en [Bras, 06]. El sistema está equipado con una cámara la cual está montada en el vehículo. Como marcas visuales se utiliza una plantilla plana, llamada “plano objetivo”, la cual contiene un conjunto de puntos de color disjuntamente distribuidos. En el proceso de visión los datos son extraídos de la imagen y convertidos en una lista de píxeles guardando el dato de su distribución espacial. Los autores mencionan que a su conocimiento es el primer sistema de control servo visual basado en imagen que se reporta en un robot aéreo.

A diferencia de los dos trabajos anteriormente descritos, en [Iwatani, 08] el sistema visual no está montado en el vehículo. Como visión utiliza cuatro cámaras ubicadas fijamente en el ambiente y orientadas hacia el techo del área de interés. Las marcas visuales son cuatro pequeñas pelotas negras adheridas a las cuatro patas del helicóptero. El sistema de control servo visual propuesto es robusto en cuanto al método de seguimiento visual. Se plantea que aun cuando el controlador pierda las características en una imagen este puede reencontrarlas con gran rapidez.

Dentro de los sistemas acuáticos destacan los vehículos submarinos autónomos (AUVs Autonomous Underwater Vehicles). Desde años atrás se reportan trabajos que dejan visualizar la

importancia de los sistemas de control visual en vehículos acuáticos. En [Rives, 97] por ejemplo, se desarrolla un sistema para dirigir un robot acuático en tareas de inspección de tuberías. El robot debe viajar a lo largo de una tubería horizontal manteniendo su eje longitudinal alineado con el eje del tubo. El problema es planteado como geométrico, y es resuelto detectando el contorno de porciones del tubo dentro de un área de interés, con el fin de realizar un seguimiento de estos segmentos en una secuencia de imágenes. El seguimiento se realiza aplicando un filtro de Kalman.

Una estrategia de control visual es presentada en [Nuno, 02] para conducir a un vehículo acuático a través de una trayectoria específica. La parte novedosa del trabajo es la representación del piso del mar el cual es diseñado en porciones llamadas mosaicos. Un mosaico abarca gran parte del área de interés y se forma automáticamente a partir de un conjunto de imágenes. El espacio representado por el mosaico debe ser mucho mayor que el frame tomado por una sola imagen. Una estrategia de control visual es usada para dirigir el vehículo a lo largo de la trayectoria la cual evita regiones del mosaico indefinidas. Los errores de posición son determinados comparando la vista instantánea que adquiere el vehículo, con el mosaico, estos errores son usados como entrada al sistema de control para generar los comandos de movimiento.

En trabajos más recientes un sistema de control visual basado en posición (PBVS) es implementado [Karras, 08]. Este sistema puede ser usado con éxito en tareas punto a punto o en trabajos donde el vehículo debe mantener una posición fija respecto a un objetivo específico. La metodología propone una técnica de planeación de trayectoria que garantiza que el objetivo visual se mantiene siempre dentro del campo de visión de la cámara y asegura que el vehículo no tendrá colisión alguna con la superficie donde se encuentra el objetivo.

La configuración del vehículo respecto al objeto requerida en un sistema PBVS, es obtenida usando un sistema de visión laser. Este consiste en una cámara CCD y dos láseres tipo punto los cuales son colocados paralelamente al eje de la cámara. El láser proyecta dos puntos sobre la superficie donde se encuentra el objetivo y estos son visualizados por la cámara. Posteriormente se realiza un mapeo polinomial entre la posición de cada punto láser en el plano imagen, y la distancia del apuntador láser a la superficie donde se encuentra el objetivo, la posición y la distancia están directamente relacionadas. Finalmente, usando las profundidades de cada apuntador láser y la distancia entre cada uno de ellos, la configuración del vehículo, (posición y orientación), es determinada. La posición del vehículo esta dada con respecto al centro del objeto.

Una de las aportaciones destacadas en este artículo es la aplicación del método de planeación de trayectoria APF (Artificial Potential Field), quien es el responsable de minimizar el error entre la posición actual del vehículo y la posición deseada. El método APF, asegura que el objetivo no saldrá del campo de visión de la cámara y no permitirá colisión alguna del vehículo con la superficie en donde se encuentra colocado el objeto. La estrategia aplicada se basa en que el vehículo se mueve a lo largo del eje de la cámara por lo que los dos puntos laser proyectados en la superficie deberán mantenerse en el plano imagen a lo largo de una línea recta. Además, el objeto se mantendrá dentro del campo de visión si se evitan distancias cercanas entre el vehículo y la superficie de interés. El control de la dirección del vehículo, se lleva a cabo por un controlador cinemático cartesiano el cual es alimentado mediante los puntos calculados en la planeación del

camino. El trabajo presentado en esta investigación plantea aspectos interesantes relacionados con nuestra problemática. En nuestro caso por ejemplo, el robot deberá mantener una posición fija respecto a una marca visual, los autores mencionan que la metodología desarrollada puede ser utilizada en este tipo de tareas.

Otros trabajos recientes relacionados con la aplicación de técnicas de control visual en sistemas acuáticos, son descritos en [Sattar, 09] y [Sattar, 05]. La parte esencial de estas investigaciones se centra en la técnica empleada para el seguimiento de las marcas visuales. La descripción de estos artículos se presenta en la sección donde se analizan los métodos de seguimiento.

3. Casos de solución estudiados

Antes de encontrar una solución definitiva a la problemática de la presente investigación, se realizaron algunas otras experimentaciones de métodos los cuales parecían ser prometedores. En esa etapa del trabajo el problema consistía en responder tres preguntas: ¿De dónde extraer la información visual que sirva como entrada al sistema de control?, ¿Con que medio extraerla?, y ¿Qué tipo de información extraer?

Las tres metodologías analizadas y descartadas para resolver estas preguntas, se presentan a continuación:

CASO 1: Utilización de datos de profundidad provistos por un telemetro LMS200. El objetivo era utilizar los sensores con los se cuenta en el laboratorio de Robótica y Visión de Posgrado.

CASO 2: La utilización de una marca visual artificial con un modelo geométrico descriptivo.

CASO 3: La utilización de un patrón de luz compuesto de un laser puntual y un led o conjunto de leds.

CASO 1:

La utilización del telémetro láser como medio de percepción fue en primera instancia la propuesta que se manejó en la investigación.

Dentro de la navegación de los robots los elementos más utilizados y probablemente los más útiles, son los de la familia de la telemetría, estos son usados con el propósito de mantener el móvil a una distancia adecuada de los obstáculos, permitiendo así la planeación de trayectorias del robot, evadiendo dichos objetos o manteniendo su posición relativa [Ollero, 07]. Las ventajas que presentan son:

- Mediciones ópticas remotas, incluso desde grandes distancias.
- Rápidos tiempos de escaneo, de este modo es posible mover a altas velocidades los objetos a medir.
- No es necesario el uso de reflectores o marcas para la medición de objetos.
- La medición de objetos puede realizarse en cualquier posición.

- Los datos de medida son validos en tiempo real y pueden ser usados para un futuro procesamiento.
- No se requiere que la superficie a medir esté iluminada.

Este tipo de sistemas de medición láser, se utiliza como herramienta de percepción en muchas otras tareas como el monitoreo de ambientes, medición, y detección de objetos, determinación de posiciones de objetos, determinación de volúmenes, clasificación de objetos, prevención de colisión de vehículos, procesos de automatización, entre muchas otras [Kaess, 03], [Surmann, 03].

El sensor láser con el que se cuenta es un LMS200 de la empresa SICK [SICK, 04] (figura 3), que trabaja escaneando el contorno en dos dimensiones basado en el principio de tiempo de vuelo. La resolución es de cerca de 10 milímetros y la máxima distancia que puede alcanzar es de 30 metros. El entorno escaneado está entre los 100° y 180° con una resolución que varía entre 0,5° y 1°. Funciona en la frecuencia de infrarrojos por lo que no es visible y requiere una alimentación de 24V con un consumo de energía de 20W. El tiempo de respuesta es de entre 13 y 56 milisegundos y la tasa de transferencia puede variar de 9.6 a 500 kilo baudios. El tamaño que presenta es de 156 x155x210 mm en largo, alto y ancho respectivamente y un peso de 4.5 Kg. Es un láser muy ampliamente utilizado en robótica móvil por sus excelentes prestaciones.



Figura 3. Telémetro laser LMS200.

Al realizar un análisis de la posibilidad de su empleo se visualizo que algunas de las características antes mencionadas como velocidad de escaneo, precisión y alcance son muy favorables para la aplicación de interés. Sin embargo, debido a diferentes causas esta opción ha sido descartada para navegar una plataforma acuática de dimensiones chicas y medianas, debido principalmente a que los materiales que conforman el dispositivo no son resistentes al agua y el tamaño y peso son superiores a los deseados para mantener el equilibrio y/o la flotabilidad, además de que el

constante movimiento del agua provocaría lecturas erróneas del telemetro y en consecuencia un posicionamiento deficiente de la plataforma acuática.

CASO 2: Utilización de una marca visual artificial.

Las marcas visuales (landmarks en inglés) son definidas generalmente como objetos en el ambiente los cuales proveen información que permite obtener con un alto grado de precisión la localización de un robot. Para que esto se cumpla un sistema basado en marcas visuales usualmente debe satisfacer ciertas suposiciones y condiciones como lo son:

- Los objetos o las marcas son pasivas, es decir se ubican en un sitio específico el cual sirve de referencia durante la navegación.
- Las marcas son artificiales, es decir, son creadas específicamente para facilitar la tarea de localización.
- La marca siempre debe estar dentro del campo visual del robot.

Sin embargo no siempre es fácil cumplir con estas condiciones. No siempre los ambientes de trabajo son flexibles y no siempre pueden adaptarse a las condiciones de un sistema de navegación en particular.

Trabajar con marcas artificiales puede requerir modificaciones significativas en el ambiente. Las marcas son locales y en espacios grandes de trabajo se pueden requerir una gran cantidad de marcas para cubrirlo. En un trabajo reportado del Laboratorio de Robótica de Stanford se utilizaron aproximadamente treinta marcas fijadas en el techo para cubrir el área requerida [Siegwart, 04].

Una solución a este problema es trabajar con marcas naturales. En este caso se seleccionan características del ambiente que pueden ser de objetos ya existentes (muebles, puertas, lámparas, etc.) o del ambiente mismo como corredores, marcos de puertas, paredes rectas, etc., de donde se extraen características geométricas como curvas líneas o esquinas [Nguyen, 03], [Luo, 08] [Feng, 09].

Otro problema en estos métodos es cuando la marca sale del campo visual del robot. En este caso el sistema únicamente se localiza mediante información de los sensores propios del robot (dead-reckoning, [Borenstein]), por lo que el error acumulativo crece hasta que la marca visual es detectada para corregir dicho error de posición. En este caso la navegación del robot debe asegurar desplazamientos suficientemente cortos para no perder de vista una marca de otra y lograr así una buena precisión en la relocalización, [Siegwart, 06].

Análisis del método a emplear

La propuesta en este caso fue utilizar una marca artificial siguiendo el esquema planteado en el trabajo de González [González, 05]. En este trabajo se utiliza una marca artificial de tipo rectángulo (ver figura 4) sobre el cual se formula un código estructurado con tres figuras geométricas (un

círculo “O”, un cuadrado “C” y un triángulos “T”), un triángulo mas se agrega con el fin de definir el posicionamiento de la marca. Las figuras empleadas manejan diferentes colores para facilitar su reconocimiento. El propósito del código multicolor es poder reconocer las diversas marcas colocadas en el ambiente de trabajo del robot. Cada marca tiene un orden distinto de figuras (ejemplo: marca1 = OCT, marca2 = OTC,...etc.) las cuales permiten reconocer la marca uno de la dos, y así sucesivamente.

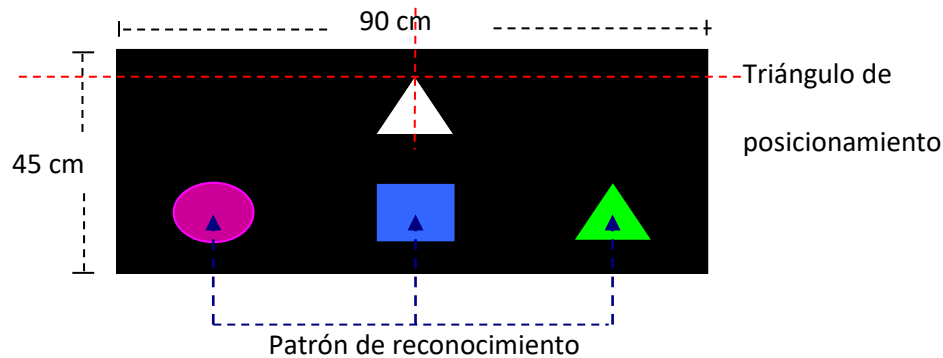


Figura 4. Marca artificial utilizada en el trabajo de González [Gonzales, 2005].

El trabajo presentado por González difiere con la presente investigación en lo siguiente:

- En [González, 05] se emplean varias marcas en el ambiente ya que el robot se deberá relocalizarse mientras navega. En el presente trabajo el vehículo será posicionado en un punto fijo específico sobre la superficie de agua y visualizará la marca para permanecer sobre dicho punto mientras realiza el trabajo de medición (solo se emplea una sola marca).
- Otra diferencia es que en [González, 05] se requiere información odométrica y se localiza al robot respecto a un sistema de referencia universal. En nuestra investigación no se requiere mayor información que la posición del robot en (x, y, θ) respecto a la marca artificial.

De acuerdo a lo anterior, en este caso se planteo utilizar una marca la cual únicamente se compondría de un rectángulo negro y un triángulo blanco, este ultimo para indicar el posicionamiento de la marca (ver figura 5). Los demás elementos son eliminados ya que para nuestro problema únicamente se requiere una única marca.

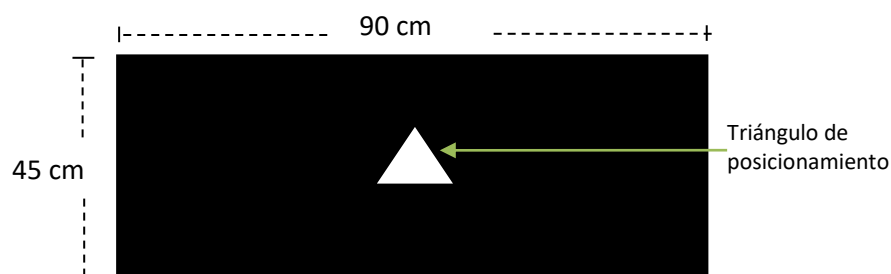


Figura 5. Marca artificial simplificada para el sistema visual de nuestro problema.

El objetivo del sistema basado en marcas visuales es detectar la posición de la plataforma respecto a la marca. La configuración correcta del sistema será cuando el vector central de la marca se encuentre alineado con la normal de la cámara (ver figura6). La cámara estará montada en la plataforma acuática y para simplificar los cálculos los sistemas coordenados plataforma/cámara serán confundidos. La distancia d entre la marca y la cámara es conocida ya que es un parámetro que el operador define. La configuración de la plataforma estará dada por sus coordenadas (x, y, θ) .

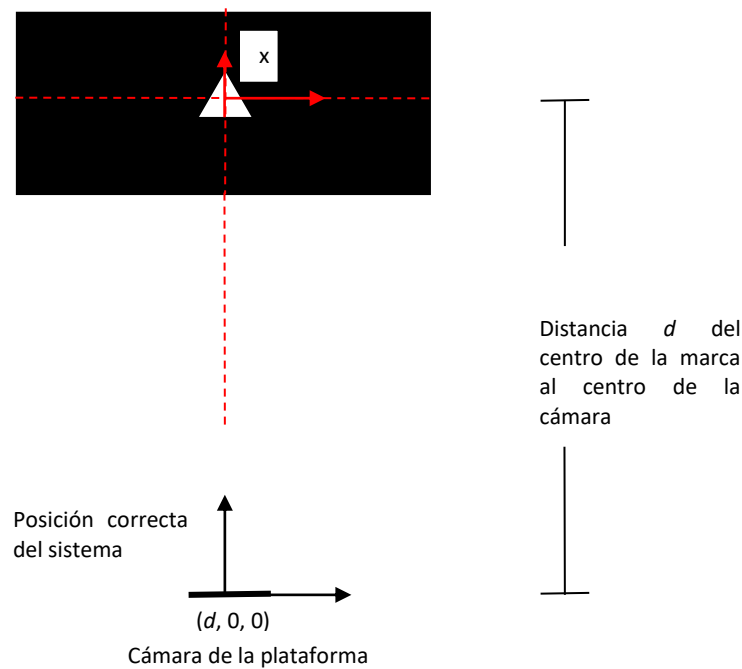


Figura 6 Configuración ideal para la mediciones de una vertical.

Debido al oleaje y a la corriente del agua, la posición y orientación el vehículo acuático con respecto a la marca, se verán modificadas. Para detectar la nueva posición de la plataforma se emplearán las características de la marca las cuales son: las distancias vertical izquierda y derecha del rectángulo denotadas por DVI y DVD respectivamente, las distancias horizontal superior e inferior denotadas por DHS y DHI, respectivamente. Los vértices del rectángulo definidos por los puntos (p_1, p_2, p_3, p_4) y las diagonales definidas por dichos puntos (ver figura 6). Consideremos en la misma figura 6, la cámara que visualiza la marca desde una posición (x, y) desconocidas, y v_1 y v_2 los vectores que van desde el origen de la cámara al punto p_1 y p_3 , respectivamente.

A partir de este esquema podemos visualizar que mediante la magnitud de los vectores v_1 y v_2 se podría obtener la posición de la cámara (x, y) desde donde se visualiza la marca.

Analizando la figura 7 se puede ver que el grupo de vectores que convergen en cada punto forma un espacio proyectivo unidimensional al cual, en geometría proyectiva se le conoce como haz de líneas, de donde el cálculo de la razón cruzada permitirá conocer la magnitud de los vectores.

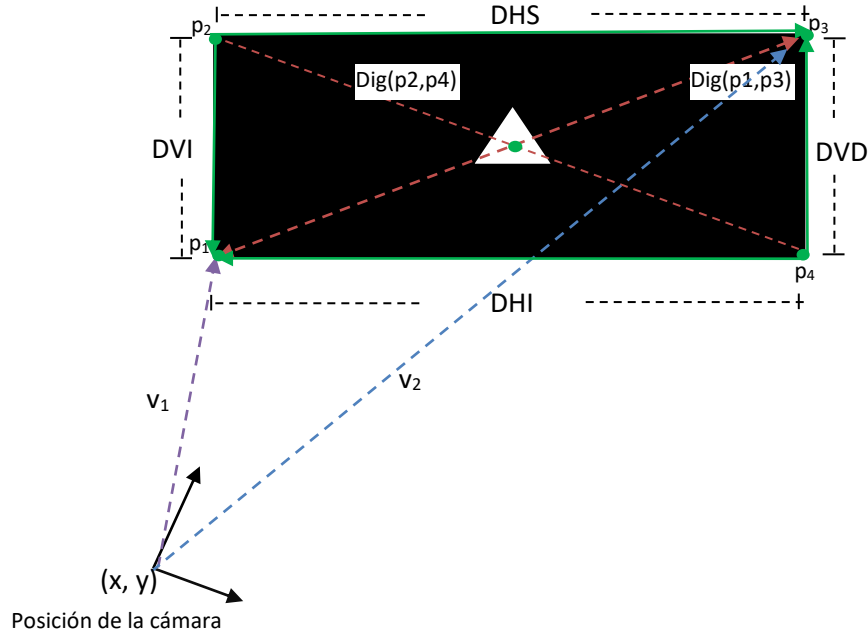


Figura 7. Visualización d la marca.

Definamos un haz de líneas como el conjunto de líneas en P_2 que pasan a través de un mismo punto. Ahora bien debido al principio de dualidad de puntos y líneas existe una razón cruzada equivalente para las líneas.

Razón cruzada de cuatro líneas (caso específico de la presente investigación).

Consideremos cuatro líneas L_1 , L_2 , L_3 y L_4 de P^2 que coinciden en un punto común. La razón cruzada de $(L_1, L_2, L_3$ y $L_4)$ está definida como la razón cruzada (P_1, P_2, P_3, P_4) de los cuatro puntos de intersección con cualquier línea L . La razón cruzada del haz de líneas se calcula mediante la ecuación 8, donde los ángulos $(\alpha_{13}, \alpha_{14}, \alpha_{23}, \alpha_{24})$ existentes entre las líneas son los mostrados en la figura 8.

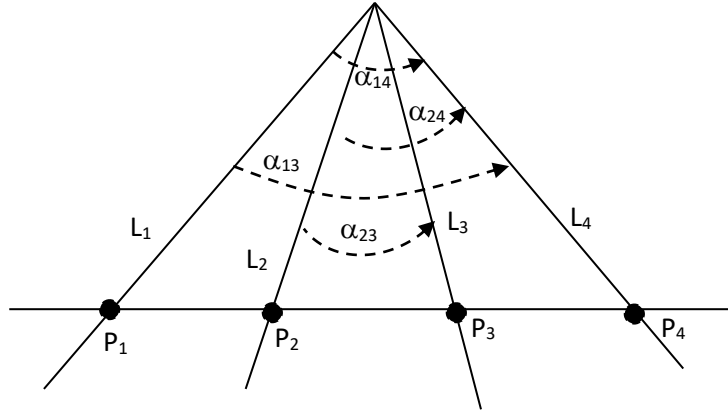


Figura 8. Razón cruzada de un haz de cuatro líneas.

$$Cv(L_1, L_2, L_3, L_4) = \frac{\text{sen } \alpha_{13} \quad \text{sen } \alpha_{24}}{\text{sen } \alpha_{23} \quad \text{sen } \alpha_{14}} \quad (8)$$

De lo anterior $Cv(P_1, P_2, P_3, P_4) = Cr(L_1, L_2, L_3 \text{ y } L_4)$, donde el valor de Cv es independiente de la elección de L .

Regresando a la figura 8, se calcula a partir de la ecuación 1 la razón cruzada Cv_1 del vector v_1 , de las líneas correspondientes a los vectores (v_1 , DVI , DHI , $Diag13$) los cuales se interceptan en el punto p_1 y está dada por, [Gonzalez, 2005]:

$$Cv_1 = \frac{\text{sen} \left(\tan^{-1} \left(\frac{mDiag13 - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x}}{1 - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x} \times mDiag13} \right) \right) \times \text{sen}(\alpha(mDVI_mDHI))}{\text{sen}(\alpha(mDVI_mDiag13)) \times \text{sen} \left(\tan^{-1} \left(\frac{mDHI - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x}}{1 - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x} \times mDHI} \right) \right)} \quad (9)$$

, para determinar los ángulos α requeridos en la ecuación (8), se calcula primero las pendientes de los vectores involucrados mediante las siguientes ecuaciones:

$$mv_1 = \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x} \quad (10)$$

$$mDVI = \frac{p_{1y}-p_{2y}}{p_{1x}-p_{2x}} \quad (11)$$

$$mDiag13 = \frac{p_{1y}-p_{3y}}{p_{1x}-p_{3x}} \quad (12)$$

$$mDHI = \frac{p_{1y}-p_{4y}}{p_{1x}-p_{4x}} \quad (13)$$

Donde mv_1 es la pendiente del vector v_1 , $mDVI$ es la pendiente del vector definido por la distancia vertical izquierda del rectángulo, $mDHI$ es la pendiente de la distancia horizontal inferior y $mDiag13$ es la pendiente de la diagonal entre los puntos 1 y 3. A partir de las ecuaciones (10-13) determinamos los ángulos requeridos en la ecuación (8):

$$\alpha (mv_1_mDiag13) = \tan^{-1} \left(\frac{mDiag13 - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x}}{1 - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x} \times mDiag13} \right) \quad (14)$$

$$\alpha (mDVI_mDHI) = \tan^{-1} \left(\frac{mDHI - mDVI}{1 - mDVI \times mDHI} \right) \quad (15)$$

$$\alpha (mDVI_mDiag13) = \tan^{-1} \left(\frac{mDiag13 - mDVI}{1 - mDVI \times mDiag13} \right) \quad (16)$$

$$\alpha (mv_1_mDHI) = \tan^{-1} \left(\frac{mDHI - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x}}{1 - \frac{p_{1y}-y}{p_{1x}-x} \times mDHI} \right) \quad (17)$$

De esta misma manera se obtiene la razón cruzada Cv_3 del haz formado con las líneas v_3 , $Diag13$, DHS , DVD , quedando como sigue:

$$Cv_3 = \frac{\sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{mDHS - \frac{p_{3y}-y}{p_{3x}-x}}{1 - \frac{p_{3y}-y}{p_{3x}-x} \times mDHS} \right) \right) \times \sin(\alpha(mDiag13_mDVD))}{\sin(\alpha(mDiag13_mDHS)) \times \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{mDHS - \frac{p_{3y}-y}{p_{3x}-x}}{1 - \frac{p_{3y}-y}{p_{3x}-x} \times mDVD} \right) \right)} \quad (18)$$

Nótese que el cálculo de las razones cruzadas Cv_1 y Cv_3 (ecuaciones 9 y 18) depende de los valores (x, y) desconocidos que corresponden a la posición de la cámara en dicho instante. Por lo que para la resolución de dichas ecuaciones se toman los valores reales de cv_1 y obtenidos mediante el proceso de calibración de la cámara permitiendo tener así un sistema de ecuaciones con solo dos incógnitas las cuales son resueltas mediante un método iterativo [Saad, 96].

Con la resolución de las ecuaciones 9 y 18 se encuentra la posición de la cámara desconocida. Sin embargo, este proceso considera que el ángulo del eje de la cámara con respecto al eje de la marca es cero, por lo que la orientación θ del sistema no se puede calcular, por lo que este método fue descartado.

CASO 3: La utilización de un patrón de luz.

Un método alternativo propuesto es utilizar un patrón de luz que permita calcular la distancia y facilite el cálculo de la orientación de la cámara. Este método emplearía un laser puntual el cual se proyectaría en el ambiente y la cual se trataría de mantener alineada con una luz de tipo led proyectada hacia la cámara. En este caso la cámara como medio de percepción estaría en el ambiente y el patrón de luz estaría montado en la plataforma acuática.

Se montó una estructura la cual pudiera proyectar al ambiente una luz láser, este rayo se alineó con una luz de led azul. El patrón se muestra en la imagen de la figura 9. Las primeras tomas se hicieron en interiores con el fin de analizar su comportamiento inicial. La figura 10 muestra la detección del patrón de luz empleado.

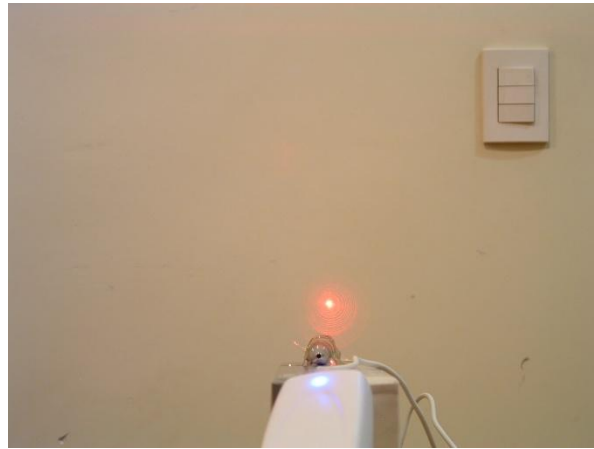


Figura 9. Patrón de luz a utilizar como referencia visual.

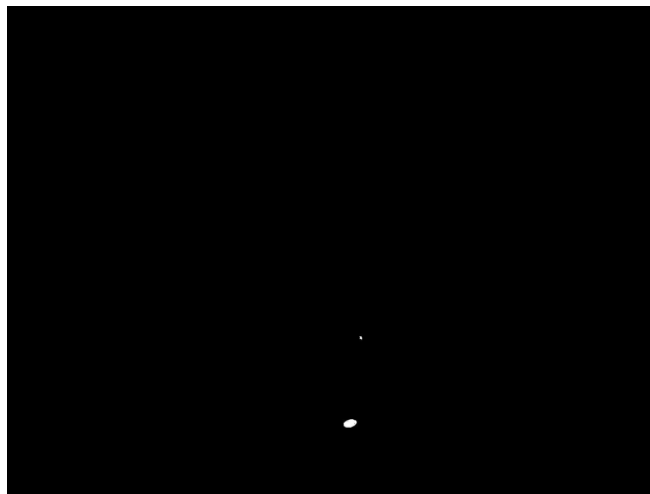


Figura 10 Detección del patrón de luz.

La figura 11 muestra una imagen en exteriores. Al realizar un acercamiento como se puede apreciar en la figura 11 (b) el rayo láser es casi imperceptible. El tratamiento tampoco respondió a la detección (figura 12). En este caso se determinó proyectar el láser sobre una superficie negra opaca como se muestra en la imagen de la figura 13. El láser es mucho más visible y su detección es posible ya que puede ser detectado sobre la superficie negra (ver figura 14).



(a)

(b)

Figura 11. Imagen en exteriores.



Figura 12. Imagen 10 después de aplicar el tratamiento de detección.



Figura 13. Proyección del laser sobre una superficie negra.

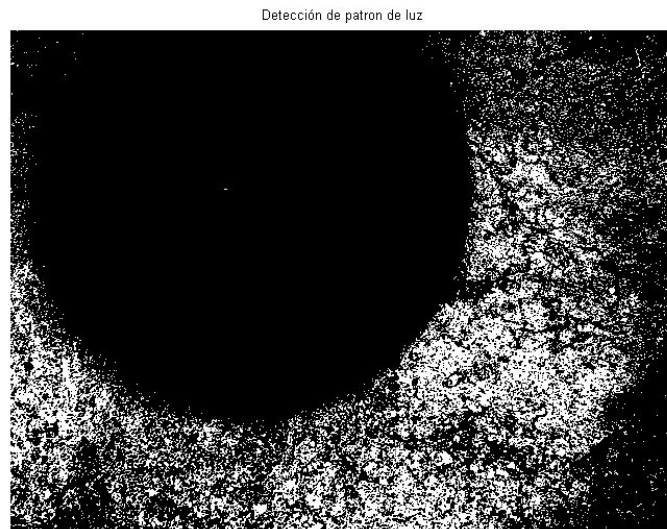


Figura 14. Detección del rayo láser.

Al igual que los anteriores, este método fue descartado. La limitación para la detección del haz de luz laser sobre una superficie contrastante derivaría en el mismo problema que con la utilización de una marca visual en el ambiente (caso 2). La superficie de proyección debería ser bastante grande para que el haz permaneciera dentro de dicha superficie, lo cual vuelve este caso inviable.

4. Método propuesto

Como ya se ha mencionado en el problema aquí descrito, se intenta mantener un vehículo acuático sobre la línea de mediciones (plano vertical definido por el eje Z_c) y con la orientación alineada al cauce del río ($X_r \parallel X_c$). Esta situación es ilustrada por la figura 15, donde se aprecia una posible configuración inicial (X'_r, Y'_r, ϕ') y la postura deseada para la realización de algunas mediciones ($X_r, Y_r, \phi=0$).

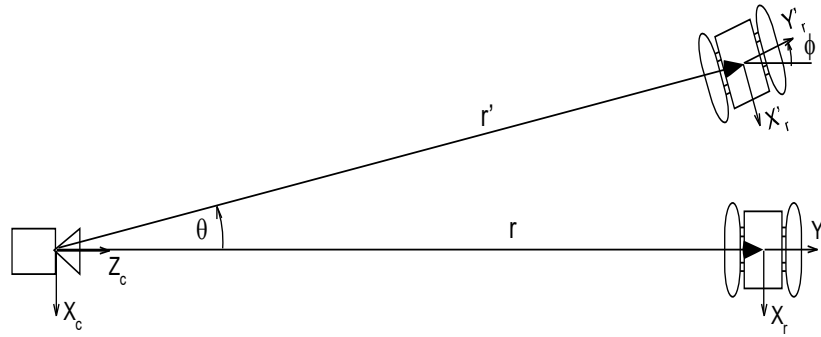


Figura 15. Localización de la plataforma con respecto al sistema de referencia de la cámara.

Para resolver este problema se desarrolló un sistema de control con retroalimentación visual del tipo ojo en mano, el cual se describe en seguida.

4.1. Definición de características visuales utilizables

El proceso de extracción de características finalmente empleado se basa en la utilización de una marca visual artificial con una mayor simplicidad que la analizada en el caso 2 (ver sección 3). La diferencia con este caso es que la marca será montada en el vehículo y la cámara será colocada en el ambiente de manera que el sistema visualice ambos robot y marca. Esta idea asegurará la relación marca posición del vehículo. El objeto empleado como marca es un cono de color fácilmente distinguible en el ambiente natural donde se pretende emplear el SA-1. Adicionalmente, el vértice del cono ha sido marcado de tal manera de diferenciarlo del resto de la superficie de éste. El procesamiento de la imagen permite aislar la información referente al cono, con lo cual es posible obtener los parámetros propuestos para las acciones de control.

Así, en el método propuesto el objetivo es hacer aparecer tanto el centroide de la marca, como el vértice de esta, en un punto perteneciente a la línea $x = 0$ del plano imagen.

La figura 16 es una sección de una imagen experimental considerada para ilustrar las características propuestas como entradas al controlador. El centro de gravedad de la región detectada se considera el centro de la base del cono, y sirve para definir la posición relativa del vehículo con respecto al plano central vertical de la imagen (que sirve para definir la línea de mediciones), ilustrado por el segmento de línea vertical. La diferencia entre el vértice del cono y el centro de gravedad indica el error en la orientación de la plataforma.

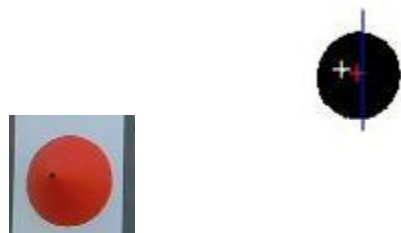


Figura 16. Características empleadas por el control basado en imagen

El estado deseado de la configuración de la plataforma es $x_v = x_{cg} = 0$, y las ecuaciones de medida del error para las acciones de control son:

$$e_\phi = x_v - x_{cg} \quad (19)$$

y

$$e_x = x_{cg} \quad (20)$$

4.2. Esquema de Servo Control Propuesto

El control de la posición y del ángulo de la orientación del objetivo se puede realizar de diversas maneras, una de ellas puede ser como la descrita en [Chaumette, 2007], en la cual un sistema híbrido es propuesto. En éste, el sistema es descompuesto en dos partes, una de ellas controlada por información proveniente de un sistema PBVS, y la otra por información obtenida directamente de la imagen (IBVS). En ese sistema, como en muchos otros, se trata de hacer llegar el móvil que porta la cámara hasta una posición en la cual se puede observar la vista deseada del objeto en cuestión. En el sistema aquí descrito la cámara está fija (configuración eye-to-hand), y lo que se desea es mover el objeto (o sea la plataforma acuática), de tal manera de obtener una vista de él posicionado en la línea de medidas con una orientación paralela al plano imagen (figura 15). Con la finalidad de simplificar el procedimiento, se propone un control visual clásico basado en imagen, en el cual las mediciones en la imagen son simplemente las coordenadas de los puntos x_v y x_{cg} . El control es el descrito en la sección 2.2.

Este es el diseño básico implementado en la mayoría de los servo sistema visuales, y para el caso aquí descrito lo que resta por resolver de este método es definir de qué manera puede ser estimada la matriz de interacción $\widehat{L}_e^+$. ya que s es fijado como las coordenadas de los puntos x_v y x_{cg} .

4.3. Matriz de Interacción

La matriz de interacción es el medio más directo de relacionar la variación de la posición de un punto en el espacio 3D con la variación de sus características en el plano imagen. Controles clásicos basados en la imagen emplean la expansión de primer orden de Taylor de la función de proyección para estimar localmente la variación de la configuración de la cámara a partir de las variaciones de las características de la imagen. Algunos otros trabajos han propuesto utilizar una representación más completa empleando para ello una aproximación de hasta segundo orden [Lapresté, 04]. En este trabajo, se considera igualmente válido utilizar la expansión de primer orden de Taylor de la función de proyección para estimar la matriz de interacción (*Jacobiano*) cuando la cámara permanece estática y son los puntos 3D observados los que se mueven.

De acuerdo a la teoría sobre la geometría de la imagen y la proyección perspectiva [Forsyth, 03], [Trucco 98], un punto 3D de coordenadas $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$ referidas al sistema coordenado de la cámara, se proyecta en el plano imagen como un punto de coordenadas $\mathbf{x} = (x, y)$ de acuerdo a las ecuaciones de proyección:

$$\begin{cases} x = \frac{x}{z} = (u - c_u)/f\alpha \\ y = \frac{y}{z} = (v - c_v)/f \end{cases} \quad (21)$$

donde (u, v) son las coordenadas del punto imagen expresadas en pixeles. c_u y c_v son las coordenadas del punto principal, f es la longitud focal y α es la proporción de las dimensiones del pixel (éste último parámetro permite considerar que los pixeles no son exactamente cuadrados). Estos cuatro valores conforman lo que son los parámetros intrínsecos de la cámara. En este caso el conjunto de características a considerar de la imagen son $\mathbf{s} = \mathbf{x} = (x, y)$, las coordenadas del punto en el plano imagen.

Tomando las derivadas con respecto al tiempo de las ecuaciones de proyección (21), se obtiene:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{x}}{z} - \frac{x\dot{z}}{z^2} = (\dot{X} - x\dot{Z})/Z \\ \dot{y} = \frac{\dot{y}}{z} - \frac{y\dot{z}}{z^2} = (\dot{Y} - y\dot{Z})/Z \end{cases} \quad (22)$$

La aplicación de estas expresiones se puede realizar empleando para ello el estudio sobre la velocidad de un cuerpo rígido; éste permite relacionar la velocidad del objeto en el espacio de trabajo y los cambios correspondientes que ocurren en la imagen.

Considérese por ejemplo al vehículo de interés moviéndose en un espacio de trabajo $\mathcal{T} \subseteq \text{SE}^3$. En el marco de referencia de la cámara, el movimiento es descrito por una velocidad $\Omega(t) = [\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)]^T$ y una velocidad de translación $\mathbf{v}(t) = [v_x(t), v_y(t), v_z(t)]^T$. La rotación actúa alrededor de un punto, que en este caso se considera es el origen del sistema coordenado, en este caso, el sistema coordenado de la cámara.

Considérese que $\mathbf{P}$ es el punto que se desea controlar de la plataforma acuática, con coordenadas $[X, Y, Z]^T$ referidas al sistema base (sistema coordenado de la cámara). Las variaciones en el tiempo de las coordenadas de este punto con respecto al sistema base son:

$$\begin{cases} \dot{X} = -v_x - Z\omega_y + Y\omega_z \\ \dot{Y} = -v_y - X\omega_z + Z\omega_x \\ \dot{Z} = -v_z - Y\omega_x + X\omega_y \end{cases} \quad (23)$$

Lo cual puede ser escrito en notación vectorial como:

$$\dot{\mathbf{P}} = -\mathbf{v} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{P} \quad (24)$$

Substituyendo (23) en (22), y agrupando términos se obtiene:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{-v_x}{z} + \frac{x}{z}v_z + xy\omega_x - (1 + x^2)\omega_y + y\omega_z \\ \dot{y} = \frac{-v_y}{z} + \frac{y}{z}v_z + (1 + y^2)\omega_x - xy\omega_y - x\omega_z \end{cases} \quad (25)$$

Matricialmente esto puede representarse como

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{L}_x \mathbf{v}_p \quad (26)$$

donde la matriz de interacción que relaciona la velocidad de la plataforma con $\mathbf{x}$ es:

$$\mathbf{L}_x = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -1 - x^2 & y \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1 + y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (27)$$

y $\mathbf{v}_p = \dot{\mathbf{r}}$, el cual contiene juntos $\mathbf{v}$ y $\boldsymbol{\Omega}$, y definen lo que es conocido en robótica como un *tornillo de velocidad*:

$$\dot{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (28)$$

En la matriz $\mathbf{L}_x$ el valor Z es la profundidad del punto relativo al marco de referencia de la cámara, el cual debe de alguna forma ser estimado a fin de que pueda ser empleada esta matriz. Por lo tanto, ya que $\mathbf{L}_x$ no puede ser directamente empleada en (4), una estimación o una aproximación debe ser utilizada. De igual manera, los parámetros intrínsecos de la cámara están implicados en el cálculo de x e y , y para todo ello es necesario contar con la calibración de la cámara.

4.4. Calibración de la Cámara

La idea clave detrás de la calibración es desarrollar las ecuaciones de proyección que relacionan las coordenadas conocidas de un conjunto de puntos 3D y sus proyecciones sobre el plano imagen, y resolverlas para determinar los parámetros de la cámara [Trucco, 98]. Para obtener de manera simple las coordenadas de algunos puntos 3D, los métodos de calibración de cámara utilizan una o más imágenes de un patrón de calibración.

La calibración de la cámara requiere de la determinación de dos tipos de parámetros:

Parámetros Extrínsecos:

R , la matriz de rotación de 3×3 ,

T , el vector de translación de 3D

Parámetros Intrínsecos:

$f_x = f/s_x$, longitud focal en unidades de tamaño de pixeles horizontales efectivos,

$\alpha = s_y/s_x$, relación de aspecto,

(o_x, o_y) , coordenadas del centro de la imagen,

k_1 , coeficiente de distorsión radial.

El método que se empleo para la determinación de la matriz de calibración es el descrito por [Schalkoff, 89]:

De la ecuación del modelo de la cámara

$$ch = \text{PCRG}wh \quad (29)$$

Consideremos que $A = \text{PCRG}$ entonces A contiene todos los parámetros de la cámara y la ecuación puede expresarse como

$$ch = Awh \quad (30)$$

donde lo expresamos

$$\begin{bmatrix} c_{h1} \\ c_{h2} \\ c_{h3} \\ c_{h4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

recordando que las coordenadas cartesianas son obtenidas al dividir los primeros elementos por el último tenemos que:

$$x = c_{h1}/c_{h4} \quad y = c_{h2}/c_{h4} \quad (32)$$

donde tenemos que

$$c_{h1} = xc_{h4} \quad y \quad c_{h2} = yc_{h4} \quad (33)$$

substituyendo c_{h1} y c_{h2} y desarrollando el producto matricial obtenemos:

$$\begin{aligned} xc_{h4} &= a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}Z + a_{14} \\ yc_{h4} &= a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}Z + a_{24} \\ c_{h4} &= a_{41}X + a_{42}Y + a_{43}Z + a_{44} \end{aligned} \quad (34)$$

substituyendo c_{h4} en las dos primeras ecuaciones tenemos:

$$\begin{aligned} a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}Z + a_{14} - a_{41}XX - a_{42}XY - a_{43}XZ - a_{44}X &= 0 \\ a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}Z + a_{24} - a_{41}YX - a_{42}YY - a_{43}YZ - a_{44}Y &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

igualando a_{44} a uno y despejando x y y , matricialmente se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(xX) & -(xY) & -(xZ) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -(yX) & -(yY) & -(yZ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{24} \\ a_{41} \\ a_{42} \\ a_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (36)$$

La matriz A ha sido convertida de renglones a un vector de parámetros. Un solo par de puntos permite dos ecuaciones y 11 incógnitas. Dado n como un par de puntos formulamos la ecuación anterior como:

$$Q a = d \quad (37)$$

De un punto dado se generan dos ecuaciones y 11 incógnitas por lo que n debe ser como mínimo n = 6 para que el sistema sea consistente.

En el caso donde la sensibilidad numérica es insignificante, se propone formular la solución de mínimos cuadrados en términos de la pseudo-inversa (debido a que la matriz no es cuadrada) de Q denotada como Q⁺ como:

$$a^e = Q^+ d \quad (38)$$

donde

$$Q^+ = (Q^T Q)^{-1} Q^T \quad (39)$$

La cámara empleada en las experimentaciones es una Sony SSC-DC393 a color provista de una lente Tamron varifocal de 2.8-12 mm.

4.5. Estimación de Profundidad

La matriz de calibración permite obtener las características visuales de los puntos, necesarias para calcular las acciones de control. Adicionalmente, se debe contar al menos con una estimación de la distancia de la cámara a la marca, de acuerdo a lo especificado en (27). Por tal motivo es necesario calcular de alguna manera la profundidad, para lo cual se decidió emplear el método propuesto por [Trucco, 98], el cual permite determinar la configuración (*pose*), es decir la localización 3D, de los puntos de un objeto con respecto al marco de referencia de la cámara. Esto se puede establecer como el problema de determinar la transformación rígida (matriz de rotación $\bar{R}$ de elementos r_{ij} , y el vector de translación $\bar{T} = [T_x, T_y, T_z]^T$) que permita alinear los marcos de referencia de la cámara y del modelo del objeto, es decir:

$$[X_i, Y_i, Z_i]^T = \bar{R} P_i^m + \bar{T} \quad (40)$$

El procedimiento está basado en la relación existente entre un punto del objeto y un punto de la imagen, ambos en coordenadas de la cámara, dada por las proyecciones perspectivas usuales:

$$[x_i, y_i]^T = \left[\frac{fX_i}{Z_i}, \frac{fY_i}{Z_i} \right]^T \quad (41)$$

Desarrollando la ecuación (40), y substituyendo en la (41), se puede ver que la correspondencia de cada punto genera dos ecuaciones no-lineales:

$$\begin{aligned} x_i &= f \frac{r_{11}X_i^m + r_{12}Y_i^m + r_{13}Z_i^m + T_x}{r_{31}X_i^m + r_{32}Y_i^m + r_{33}Z_i^m + T_z} \\ y_i &= f \frac{r_{21}X_i^m + r_{22}Y_i^m + r_{23}Z_i^m + T_y}{r_{31}X_i^m + r_{32}Y_i^m + r_{33}Z_i^m + T_z} \end{aligned} \quad (42)$$

Los componentes desconocidos de $\bar{R}$ y $\bar{T}$ pueden ser determinados mediante el empleo de un número suficiente de correspondencias, cada una dando un par de ecuaciones como las de (42). El sistema resultante tiene seis incógnitas, ya que $\bar{R}$ depende solamente de tres parámetros libres. Las seis incógnitas son, por lo tanto $\phi_x, \phi_y, \phi_z, T_x, T_y, T_z$, siendo los tres primeros los ángulos de rotación alrededor de los ejes de referencia de la cámara.

La solución del sistema se lleva a cabo mediante el empleo del método iterativo de Newton. Éste, como cualquier otro método iterativo, empieza con una estimación inicial de $\bar{R}$ y $\bar{T}$, digamos R^0 y T^0 , y se calcula la localización de p_i mediante (16) con $R = R^0$ y $T = T^0$. Si R^0 y T^0 no están demasiado lejos de la solución real, los residuales:

$$\begin{aligned} \delta x_i &= x_i(R^0, T^0) - \bar{x}_i \\ \delta y_i &= y_i(R^0, T^0) - \bar{y}_i \end{aligned} \quad (43)$$

son pequeños, y pueden ser aproximados por una expansión de primer orden de $x_i(\phi_x, \phi_y, \phi_z, T_x, T_y, T_z)$ y $y_i(\phi_x, \phi_y, \phi_z, T_x, T_y, T_z)$ dada por (42), en una vecindad de R^0 y T^0 .

Para la expansión son necesarias las derivadas parciales. Las derivadas parciales con respecto a T_x, T_y y T_z son:

$$\frac{\partial x_i}{\partial T_x} = \frac{f}{Z_i}, \quad \frac{\partial x_i}{\partial T_y} = 0, \quad \frac{\partial x_i}{\partial T_z} = -f \frac{X_i}{Z_i^2}$$

y

$$\frac{\partial y_i}{\partial T_x} = 0, \quad \frac{\partial y_i}{\partial T_y} = \frac{f}{Z_i}, \quad \frac{\partial y_i}{\partial T_z} = -f \frac{Y_i}{Z_i^2}$$

Para las derivadas parciales respecto a los ángulos de rotación, se pueden obtener de la definición de la derivada de un vector con respecto a un ángulo de rotación, de lo cual se tiene:

$$\frac{\partial x_i}{\partial \phi_x} = -\frac{fX_iY_i}{Z_i^2}, \quad \frac{\partial x_i}{\partial \phi_y} = f \frac{X_i^2 + Z_i^2}{Z_i^2}, \quad \frac{\partial x_i}{\partial \phi_z} = -f \frac{X_i}{Z_i}$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial \phi_x} = -f \frac{Z_i^2 + Y_i^2}{Z_i^2}, \quad \frac{\partial y_i}{\partial \phi_y} = \frac{f X_i Y_i}{Z_i^2}, \quad \frac{\partial y_i}{\partial \phi_z} = f \frac{X_i}{Z_i}$$

Por lo tanto, para cada correspondencia de puntos imagen-modelo, la expansión brinda el siguiente par de ecuaciones lineales:

$$\sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial x_i}{\partial T_j} \Delta T_j + \frac{\partial x_i}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j \right] = \delta x_i \quad (44)$$

$$\sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial y_i}{\partial T_j} \Delta T_j + \frac{\partial y_i}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j \right] = \delta y_i$$

Las seis incógnitas ΔT_j y $\Delta \phi_j$ pueden ser determinadas si al menos tres correspondencias de puntos son conocidas. Para remediar los efectos de mediciones inexactas es mejor emplear un mayor número de correspondencias.

Finalmente el algoritmo aplicado para calcular la profundidad de un punto se resume en los siguientes pasos:

Algoritmo 3D_POSE

La entrada es formada por n correspondencias de puntos imagen y modelo, con $n \geq 3$, y las estimaciones iniciales de R^0 y T^0 .

1. Usar las estimaciones de R^0 y T^0 y (40) para calcular los P_i ; esto es, la localización predicha de los puntos del modelo P_i^m en el marco de referencia de la cámara.

$$[X_i, Y_i, Z_i]^T = \bar{R} P_i^m + \bar{T} \quad (45)$$

2. Proyectar los P_i sobre el plano imagen mediante (41).

$$[x_i, y_i]^T = \left[\frac{f X_i}{Z_i}, \frac{f Y_i}{Z_i} \right]^T \quad (46)$$

3. Calcular los residuales δx_i y δy_i , $i = 1, \dots, n$, de (43)

$$\delta x_i = x_i(R^0, T^0) - \bar{x}_i$$

$$\delta y_i = y_i(R^0, T^0) - \bar{y}_i \quad (47)$$

4. Resolver el sistema lineal formado por n instancias de (44) para las correcciones desconocidas ΔT_j y $\Delta \phi_j$, $j = 1, 2, 3$.

$$\sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial x_i}{\partial T_j} \Delta T_j + \frac{\partial x_i}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j \right] = \delta x_i$$

$$\sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial y_i}{\partial T_j} \Delta T_j + \frac{\partial y_i}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j \right] = \delta y_i \quad (48)$$

5. Actualizar las estimaciones del vector de translación y la matriz de rotación.
 6. Si los residuales son pequeños, terminar; si no, ir al paso 1.
-

4.6. Resultados

Extracción de características

La figura 17 muestra una imagen de tamaño original del patrón utilizado como marca artificial. Como se mencionó en la sección 4.1, este es un cono el cual se manejó de color distintivo para facilitar su identificación en el ambiente. La variación del pico del cono indicará la estabilidad de la plataforma. Si el pico se encuentra fuera del centroide de la base se determinará un error de configuración del vehículo.



Figura 17. Imagen del modelo del patrón de referencia utilizado.

En la figura 18, se muestra el resultado del proceso de visión. El tratamiento se realiza sobre toda la imagen hasta obtener la región de interés y extraer los datos característicos. La secuencia de imágenes de la figura 18 muestra el resultado del proceso completo. Se utilizan tamaños de imagen reducidos mostrando únicamente la región de interés para una mejor visualización de los resultados obtenidos.

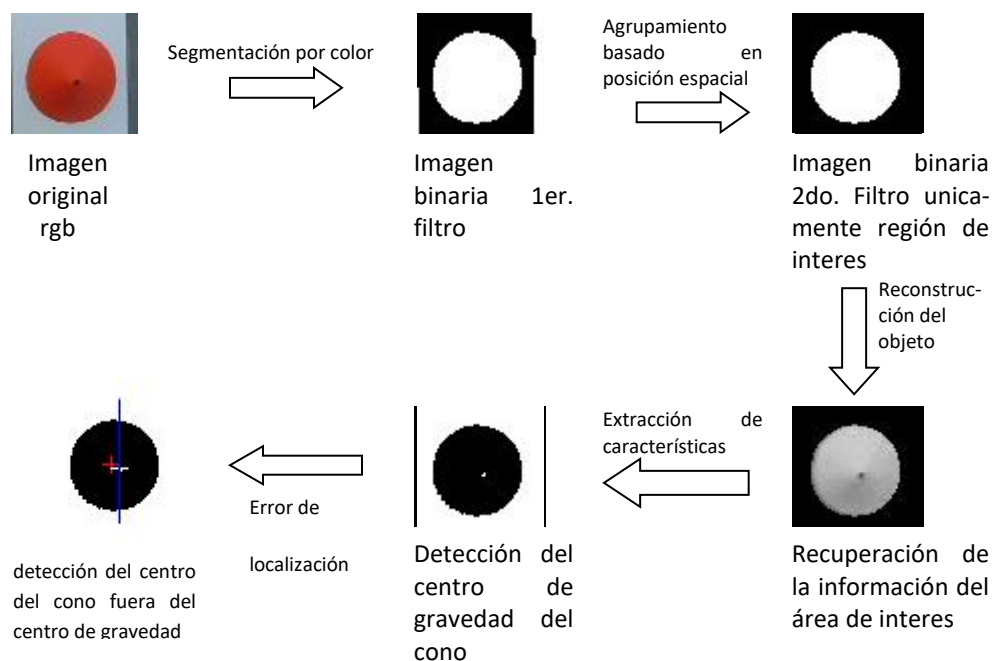


Figura 18. Proceso del sistema de visión.

Como se puede apreciar en el proceso de la figura 18 se logran obtener las características del cono y finalmente determinar el error de localización del vehículo el cual alimenta el sistema de control.

Calibración

Como se puede ver del algoritmo 3D_Pose, es necesario para éste conocer la distancia focal f de la cámara para poder resolver el problema de la localización del objeto de interés, por lo cual se realizó la calibración de la cámara. El patrón empleado para dicha calibración se forma de círculos uniformes colocados de manera irregular en el marco de referencia global, la imagen del patrón utilizado se muestra en la figura 19.



Figura 19. Ejemplo de una imagen del patrón de calibración empleado.

El algoritmo de calibración utiliza las posiciones del plano imagen de esos círculos y sus coordenadas conocidas correspondientes para calcular la posición de la cámara. El método empleado es el descrito en el apartado 4.4 y la descripción de los parámetros intrínsecos de la matriz de calibración obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Límite de Error
Longitud Focal	[662.49526 664.67737]	± [1.43403 1.54264]
Punto Principal	[352.51303 241.75088]	± [2.83489 2.60833]
Descuadre	[0.00000]	± [0.00000]
Distorsión Radial	[-0.27908 0.32025 0.00050 0.00028 0.00000]	± [0.01144 0.04729 0.00064 0.00067 0.00000]

Así, de esta manera, ya se cuenta con la información necesaria para ir aplicando los métodos para la realización del control del vehículo.

Localización de la plataforma acuática mediante la Marca.

A fin de poder aplicar el algoritmo de localización, se seleccionaron 5 puntos de la marca (el vértice más los cuatro puntos de intersección de la circunferencia con los ejes de la referencia local), referidos al sistema coordenado del objeto, con origen en el centro de la base del cono. Las coordenadas de estos puntos son:

$$\mathbf{P}^m = \begin{bmatrix} -14 & 0 & 14 & 0 & 0 \\ 0 & 14 & 0 & -14 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -18 \end{bmatrix}$$

Referido de esta manera, el eje Z_o del sistema coordenado del objeto (marca) apunta del centro de la circunferencia de la base en sentido contrario al vértice.

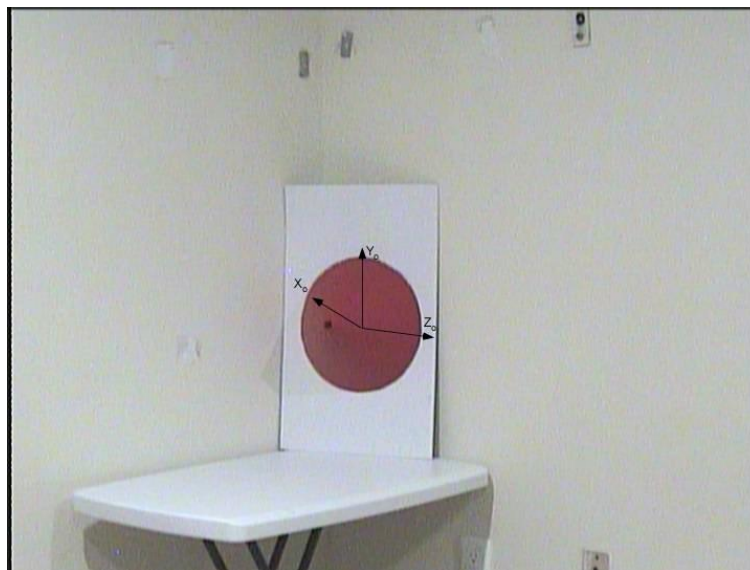


Figura 20. Imagen utilizada para prueba del algoritmo de localización.

El algoritmo de localización se probó con la imagen mostrada en la figura 20 (imagen de 720X540 pixeles), en la cual los puntos imagen correspondientes a los seleccionados para el modelo, determinados mediante el procesamiento, son los siguientes:

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -36 & 21 & 79 & 21 & 53 \\ -36 & 31 & -36 & -98 & -35 \end{bmatrix}$$

Es necesario notar que los puntos $\mathbf{p}_i$ están dados con respecto al punto principal del plano imagen.

De acuerdo a la geometría de la imagen mostrada en la figura 18, el objetivo del control visual es alinear el eje Z_o de la marca con el eje Z_c de la cámara, además situando éste en el centro vertical de la imagen. Después de la colocación del SA-1 mediante teleoperación, la marca estará seguramente próxima a esta situación, por lo cual los valores iniciales de los ángulo se consideran todos cero ($\phi_x = \phi_y = \phi_z = 0$) para el proceso de localización de la marca. Los valores iniciales del vector de Translación dependen de la colocación deseada en la cual se colocó el vehículo, por lo cual se puede aproximar dentro de ciertos límites. En el caso que corresponde a la imagen mostrada, los valores considerados fueron:

$$\mathbf{T} = [T_x \quad T_y \quad T_z] = [0 \quad -20 \quad 400]$$

La aplicación del proceso iterativo con estos valores iniciales del vector de translación $\mathbf{T}$ y los ángulos permite obtener mediante el algoritmo 3D_Pose la configuración de la marca en el espacio de trabajo. El vector de translación calculado permite conocer el valor de Z , que es el parámetro que faltaba para poder completar la matriz de interacción (ec. 27). Una vez completada esta matriz, los valores necesarios para el control del SA-1 son fácilmente calculados resolviendo la ecuación (26). La salida son los valores de control para la velocidad lineal y de rotación que mantendrá el vehículo en la posición deseada.

Velocidades Resultantes

Considerando los valores de error resultantes en base a las características consideradas de la marca en la imagen, y aplicando el procedimiento descrito en la sección 4, se obtuvieron los siguientes resultados.

Para la imagen mostrada en la figura 21, los puntos característicos de la imagen corresponden a los siguientes valores:

Característica	X (pixeles)	Y (pixeles)
Centro de gravedad de la base del cono	-177	19
Vértice del cono	-176	19

los cuales son gráficamente visualizados en la imagen resultante del proceso de visión (figura 22).



Figura 21. Imagen utilizada para prueba del algoritmo de localización y cálculo de las velocidades de control.

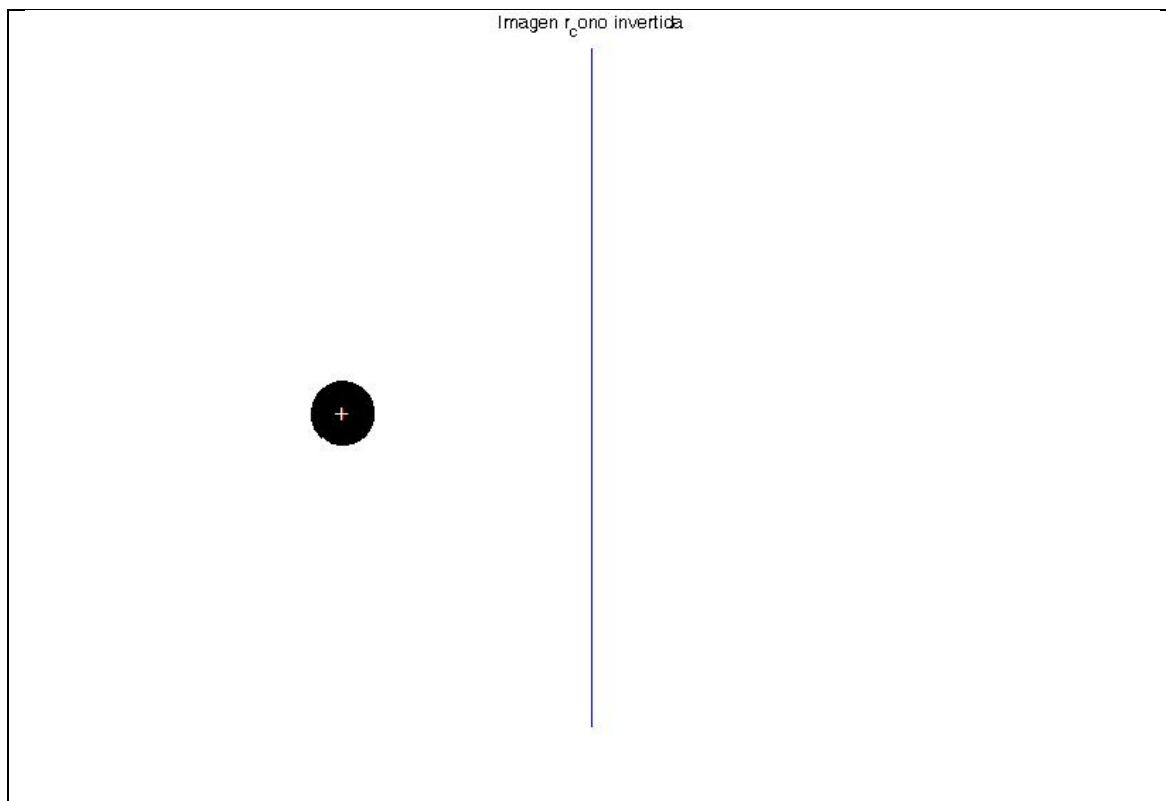


Figura 22. Detección de las características del cono a partir de la imagen 21. La línea azul marca el eje central de la imagen.

Las velocidades calculadas para este caso de acuerdo al método propuesto fueron las siguientes:

Velocidades	
Vx	1536.2
Vy	-0446.6
Vz	0004.7

ω_x	-0000.1
ω_y	0000.0
ω_z	-0000.0

Para la imagen mostrada en la figura 23, los puntos característicos de la imagen corresponden a los siguientes valores:

Punto	X (píxeles)	Y (píxeles)
Centro de gravedad de la base del cono	-7	14
Vértice del cono	0	15



Figura 23. Imagen utilizada en el segundo caso para prueba del algoritmo de localización y cálculo de las velocidades de control.

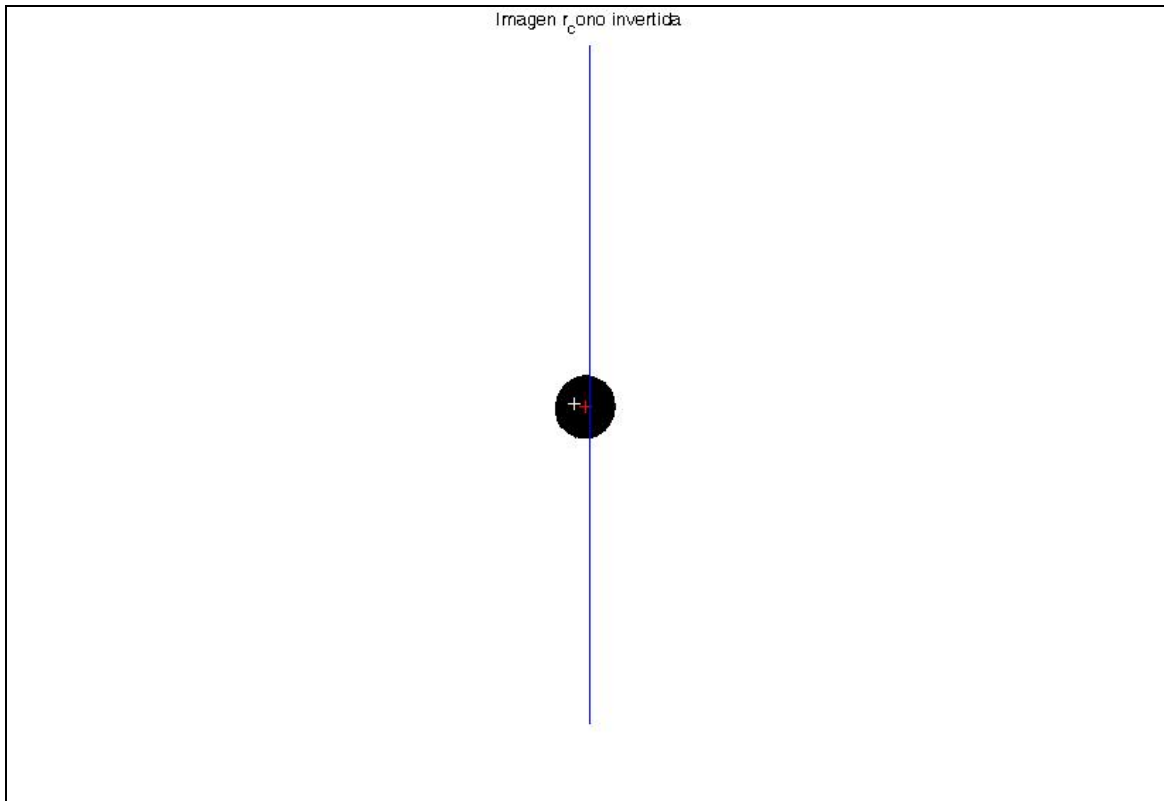


Figura 24. Detección de las características del cono a partir de la imagen 23. La línea azul marca el eje central de la imagen. La marca roja indica el centro de gravedad del cono, y la marca blanca la posición de la punta del cono.

Las velocidades calculadas fueron las siguientes:

Velocidades	
V_x	-117.6000
V_y	-42.0000
V_z	-1.0500
ω_x	-0.0738
ω_y	0.1313
ω_z	0.2625

De las tablas de velocidades se pueden dar los siguientes comentarios a propósito de los valores obtenidos con el método aplicado.

Los valores están especificados para tres velocidades de translación y tres de rotación de acuerdo al método, este es el caso más general, sin embargo, de acuerdo al modelo cinemático del vehículo en estudio, solo se dispone de dos variables de control: la velocidad de translación V_x y la velocidad de rotación ω_y . Comparando los resultados para los dos casos mostrados en la figura 21 y 23, se puede observar una mayor velocidad V_x en la primera, debido a que como se observa, el vehículo está más fuera de posición (cono alejado del centro de la imagen marcado con la línea azul). Respecto a la velocidad de rotación, el caso correspondiente a la figura 23 presenta un valor más alto, ya que como se ve, el centro del cono aparece casi al centro de la imagen lo que indica

no tener problemas de posición. Sin embargo, las marcas roja y blanca están fuera de alineación, lo cual indica que el vehículo tiene una orientación errónea y el sistema debe corregir el ángulo de orientación.

Como se puede ver, el método propuesto presenta un funcionamiento adecuado, y lo que se puede concluir es que es necesario ajustar el valor de ganancia de la ley de control propuesta λ .

5. Conclusiones

El método presentado sirve para lograr estabilizar una plataforma acuática. En el contexto de esta investigación, estabilizar la plataforma significa lograr que el vehículo permanezca en una posición y orientación determinada a pesar de las corrientes y el oleaje de la superficie hídrica. Para solucionar este problema se diseñó un sistema de control basado en retroalimentación visual. Como información visual se diseñó una marca artificial la cual proporciona información geométrica con la cual se puede determinar tanto la posición como la orientación del vehículo. El sistema de control diseñado se basó en un modelo basado en imagen del tipo ojo en mano.

6. Bibliografía

- [Borenstein] Borenstein J., Everett H.R., Feng L., Where I am? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning, Ann Arbor, Universidad de Michigan, disponible en <http://www.personal.engin.umich.edu/~johannb/position.htm>.
- [Bras, 06] Florent Le Bras, Robert Mahony, Tarek Hamel and Paolo Binetti, "Adaptive filtering and image based visual servo control of a ducted fan flying robot", Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control Manchester Grand Hyatt Hotel San Diego, CA, USA, Diciembre 2006.
- [Cid, 09] Jaime Cid M. , Fernando Reyes C., "Visual Servoing Controller for Robot Manipulators", International Conference on Electrical, Communications, and Computers, 2009.
- [Corke, 93] P. Corke, "Visual control of robot manipulators---a review", Robotics and Automation Systems, en Visual Servoing, vol. 7, World Scientific, 1993.
- [Collewet, 08] Christophe Collewet, Eric Marchand y Francois Chaumette, "Visual servoing set free from image processing", IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, Mayo 2008.
- [Chaumett, 07] Francois Chaumette, Seth Hutchinson, "Visual Servo Control", Robotics and Automation Magazine, Marzo, 2007.
- [Deguchi, 08] Deguchi, K., Sakurai, H., Ushida, S. "A goal oriented just-in-time visual servoing for ball catching robot arm", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Septiembre 2008.
- [Díaz, 09] Carlos Eduardo Díaz, "Automatización para el aforo de cuerpos de agua" Reporte del Evento Nacional de Creatividad, Instituto Tecnológico de Tepic, Noviembre, 2009.

- [Feng, 2009] Xiaowei Feng, Shuai Guo, Xianhua Li, and Yongyi He, "Robust Mobile Robot Localization by Tracking Natural Landmarks", Lecture Notes in Computer Science Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Ed. Springer Berlin / Heidelberg, Vol. 5855/2009, pp. 278-287, Nov., 2009.
- [Forsyth, 03] David Forsyth, Jean Ponce, "Computer Vision, A modern Approach", Ed. Prentice Hall, 2003.
- [González, 02] Rafael C. González Richard E. Woods, "Digital Image Processing" Ed. Pearson Education Asia, Segunda Edición, 2002.
- [González, 05] Armida Gonzalez, "Relocalización de un robot móvil utilizando marcas artificiales" Tesis Doctoral, Instituto Tecnológico de Toluca, Agosto, 2005.
- [Hua, 09] Minh-Duc Hua, Tarek Hamel, Pascal Morin, y Claude Samson, "A Control Approach for Thrust-Propelled Underactuated Vehicles and its Application to VTOL Drones", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 8, August 2009.
- [Hutchinson, 96] Seth Hutchinson, Gregory D. Hager, Peter I. Corke, "A tutorial on Visual Servo Control", Transaction on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, October 1996.
- [Iwatani, 08] Iwatani Y., Watanabe K., y Hashimoto K., "Visual tracking with occlusion handling for visual servo control", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA. Mayo, 2008.
- [Karras, 08] George C. Karras y Kostas J. Kyriakopoulos, "Visual Servo Control of an Underwater Vehicle Using a Laser Vision", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, Septiembre 2008.
- [Kaess, 2003] Kaess M., Arkin R. C., Rossignac J., "Compact Robot-Generated 3D Maps for Efficient wireless Transmission", 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Coimbra, Portugal, 2003.
- [Lapresté, 04] J. T. Lapresté, Y. Mezouar, "A Hessian Approach to Visual Servoing", International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japón, Sep. 28 – Oct. 2, 2004.
- [Liu, 2008] Yun-Hui Liu, Hesheng Wang y Zhongli Wang, "Adaptive Visual Servoing Using Common Image Features with Unknown Geometry", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, mayo 2008.
- [Luo, 08] Ren C. Luo, Shih-Chi Lin Chun Chi Lai, "Indoor Autonomous Mobile Robot Localization Using Natural Landmark", Industrial Electronics IECON 2008, Taipei, Nov 2008, pp. 1626-1631.
- [Meil, 09] Jin Mei, Zhang Liguang y Li Huiguang, "The Positioning of Binocular Stereo Visual Servoing Based on Robot Dynamics", International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009.
- [Mejía, 06] Luis Mejías, Pascual Campoy, Srikanth Saripalli y Gaurav S. Sukhatme, "A Visual Servoing Approach for Tracking Features in Urban Areas Using an Autonomous

- Helicopter”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May 2006.
- [Miura, 02] Kanako Miura, Jacques A. Gangloff, y Michel F. de Mathelin, “Robust and Uncalibrated Visual Servoing without Jacobian using a Simplex Method”, Proceedings of IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL. Luisiana. Suiza, October 2002.
- [Nguyen, 03] Nguyen Xuan Dao, Bum-Jae You, Sang-Rok Oh, Myung Hwangbo, “Visual Self-Localization for Indoor Mobile Robots Using Natural Lines”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada. Octubre 2003, pp. 1252-1257.
- [Nierobisch, 06] Thomas Nierobisch, Wladimir Fischer y Frank Hoffmann, “Large View Visual Servoing of a Mobile Robot with a Pan-Tilt Camera”, Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, October 2006.
- [Nuno, 08] Nuno Gracias, Sjoerd van der Zwaan, Alexandre Bernardino and Jos’e Santos-Victor, “Results on Underwater Mosaic-based Navigation”, Proc. Of the IEEE Oceans Conference, Misisipi, USA, Octubre 2002.
- [Okamoto, 02] Jun Okamoto Jr., y Valdir Grassi Jr., “Visual servo control of a mobile robot using omnidirectional vision”, Proc. Of Mechatronics, Universidad de Twente, junio 2002.
- [Ollero, 07] Aníbal Ollero Baturone, “Robótica, Manipuladores Y Robots Moviles “, Ed. Alfaomega, Abril 2007.
- [Petrille, 07] A.E.Petrilli Barceló, “Control visual de un robot móvil Khepera II”, Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación, Centro de Investigación en Computación, Politécnico Nacional, México 2007.
- [Rives, 97] Patrick Rives y Jean-Jacques Borrelly, “Visual Servoing Techniques Applied to an Underwater Vehicle”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, Nuevo México, April 1997.
- [Russell, 96] Stuart Russell, Peter Norving, “Inteligencia Artificial un Enfoque Moderno”, Ed. Prentice-Hall, 1996.
- [Saad, 96] Saad, Yousef, “Iterative Methods for Sparse Linear Equations”, PWS Publishing Company, 1996.
- [Sattar, 05] Junaed Sattar, Philippe Giguere, Gregory Dudek y Chris Prahacs, “A Visual Servoing System for an Aquatic Swimming Robot” In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Alberta, Canada, Agosto 2005.
- [Sattar, 09] Junaed Sattar, Gregory Dudek, “Robust Servo-control for Underwater Robots using Banks of Visual Filters”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japon, Mayo 2009.
- [Schalkoff, 89] Robert J. Schalkoff, “Digital Image Processing and Computer Vision”, Ed. Wiley and Sons, 1989.
- [SICK, 04] SICK Sensor Intelligence, <http://www.sick.com>, Julio 2004.

- [Siegwart, 04] Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, "Introduction to Autonomous Mobile Robots", impreso por MIT, Cambridge, Massachusetts, Londres Inglaterra, 2006.
- [Surmann, 03] Surmann H., Nuchter A., y Hertzberg J., "An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments", Journal Robotics and Automation Systems, Vol. 45, Issue 3-4, pp. 181-198.
- [Truco, 98] Emanuele Truco, Alessandro Verri, "Introductory techniques for 3-D Computer Vision", Ed. Prentice Hall, 1998.
- [Villalobos, 03] Noe Villalobos Ríos, "Estrategia e navegación de un robot autónomo basada en un plano láser", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Toluca, 2003.
- [Xiao, 09] Wen-Fang Xie, Zheng Li, Xiao-Wei Tu y Claude Perron, "Switching Control of Image-Based Visual Servoing With Laser Pointer in Robotic Manufacturing Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 2, Febrero 2009.
- [Zang, 09] Xuebo Zhang, Yongchun Fang y Xi Liu, "Visual Servoing of Nonholonomic Mobile Robots Based on a New Motion Estimation Technique", Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, P.R. China, Diciembre 2009.