

Sistema de Seguimiento por Imágenes Asistido por GNSS-GPS:TV Tracker

Santiago García Bravo[†] María Curetti[†] Arri Gabriela[†] Julián Pucheta[‡] y Ladislao Mathé[‡]

[†] Instituto Universitario Aeronáutico, Córdoba, Córdoba, Argentina

sbravo@iua.edu.ar mcuretti@iua.edu.ar garri@iua.edu.ar mathe@ieee.org

[‡] Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba Argentina.
jpucheta@efn.uncor.edu

Resumen— En este trabajo se presenta el desarrollo de un seguidor electro óptico, TV Tracker. Se describe la etapa mecánica así como la motorización del pedestal de dos ejes sobre el que se montó un sensor óptico para el seguimiento por imágenes. Luego se discute la máxima resolución alcanzable según la precisión de los sensores y herramientas para la instalación de la montura de seguimiento en el terreno. También se describe la etapa telemétrica de las coordenadas GPS del objetivo a seguir, que sirve de apoyo al seguimiento por imágenes en situaciones en que éstas no se encuentran disponibles debido a pérdida de la visibilidad del móvil. Se contrasta la precisión esperable de cada método de seguimiento (imágenes y GPS) y se explica el sentido de una fusión entre ambas fuentes de información para el seguimiento. También se describe el funcionamiento del software de comando del seguidor. Finalmente se ensaya el sistema en dos situaciones clave, primero se sigue un avión comercial en modo óptico sin asistencia del sistema de navegación satelital, y luego se sigue un objetivo en tierra bajo situaciones de visibilidad y ocultamiento de duración variable. Se presentan y analizan resultados y se proponen líneas de investigación futura.

Palabras Clave— TV Tracker, control, visión, fusión, información.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de seguimiento electro-óptico (E-O tracking system) puede ser visto como un ensamble de elementos esenciales que se pueden estructurar en una variedad de configuraciones para alcanzar misiones específicas, según los requerimientos. Como mínimo un sistema de seguimiento incluye: un paquete de sensores para la detección del objetivo, un sistema de posicionamiento para seguir la trayectoria del objetivo, y un método de comando para la orientación del sistema.

Los sistemas de seguimiento EO, pueden además contener instrumentos como telémetros láser, radares, y radares de corto alcance, que complementan la arquitectura del sistema proveyendo un posicionamiento preciso en el espacio y datos sobre la trayectoria de los sistemas.

Los numerosos usos para los seguidores EOs se pueden agrupar en cinco categorías: vigilancia en tiempo real, telemetría, guiado terminal de misiles, designación láser de blancos, y control de fuego de armas. [1][2]

El sistema de seguimiento de precisión por procesamiento de imágenes denominado TV Tracker es un proyecto que surge en el Instituto Universitario Aeronáutico a partir de la necesidad de lograr registros ópticos y filmicos de ensayos en vuelo (blancos) y de los distintos eventos que se sucedan durante la ejecución de los mismos.

El requerimiento surge a partir de las dificultades que se presentan al operador humano el intentar seguir por el visor de un dispositivo de videograbación a un móvil que se mueve en el cielo, o que, dada la velocidad a la que se suceden los eventos quedan muchas veces inadvertidos por el ojo humano y por lo tanto se corre el riesgo de perder el registro para su posterior observación y análisis. Esto sucede con frecuencia en ensayos de coherencia y análogos.

A partir de esta necesidad, se planteó el desarrollo de un pedestal de seguimiento automático de alta precisión (15,9 [μrad] de arco) con el fin de brindar una solución al problema de apuntado de precisión y que permitiera profundizar en el desarrollo de herramientas de teledetección. [3]

TV Tracker, es además un proyecto de interés para las aplicaciones de defensa y en la actualidad cuenta con financiación del Ministerio de Defensa mediante el programa PIDDEF en sintonía con el plan de vigilancia y control del espacio aéreo nacional. .

En este trabajo se describen los distintos módulos (ver figura 1) que componen al Sistema de Seguimiento por Imágenes Asistido por GNSS-GPS: TV Tracker, el criterio tenido en cuenta a lo largo del desarrollo del mismo explicando las consideraciones a tener en cuenta para alcanzar la precisión necesaria que se desea alcanzar, y se presentan los lineamientos para investigaciones futuras.

Este trabajo se desglosa en cuatro partes según el siguiente esquema: primero se describe la montura mecánica y se analiza la máxima resolución alcanzable. Luego se presenta la etapa electrónica de motores, drivers y controladores. A continuación se presentan los sensores del seguidor que son una cámara de video y un sistema de recepción de las coordenadas GPS del

blanco. Finalmente se presenta el software de procesamiento de la información, comando y control de todo el sistema de seguimiento.

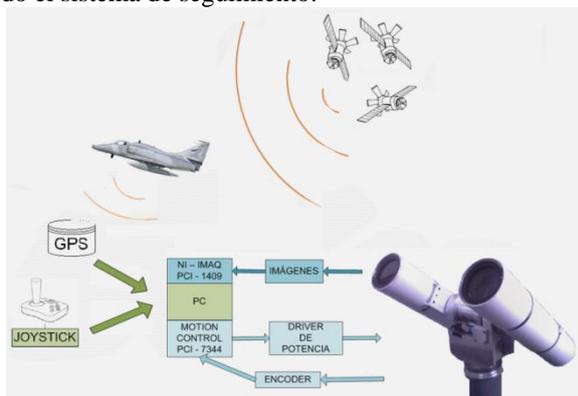


Figura 1: Sistema TV Tracker

2. DESARROLLO

2.1. Montura de TV Tracker

La montura del sistema TV Tracker es un pedestal de dos ejes, uno de rotación acimutal y otro en elevación. Ambos ejes poseen la misma relación de engranajes 7:1, los engranajes son partidos para la eliminación del juego mecánico. A esta etapa de reducción se asocian motor-reductores FAULHABER de la serie 38/2 que poseen una relación de transmisión de $R_{t_{red}} = 14:1$. El sistema cuenta con 2 motores de corriente continua con escobillas FAULHABER 90 W 3863 C con una tensión de alimentación nominal de 24 V.

Asociados al eje de los motores se encuentran encoders AGILENT TECHNOLOGIES del tipo ópticos de la serie HEDM 5500 J12 de 1024 líneas/vuelta. Aprovechando la lectura de las señales de encoder por flanco ascendente/descendente se cuadruplica la resolución de los sensores. Por lo tanto se tiene que la resolución del sistema es de 15,9 [μ rad] en cada eje. Esto significa que a 1000[m] de distancia tendríamos una desviación máxima de 1.6[cm] aproximadamente.

La montura se encuentra fijada sobre una base nivelante o tribrach, un instrumento muy utilizado en topografía y agrimensura para nivelar con gran precisión la base de teodolitos. Este dispositivo consiste en dos placas de metal triangulares, que están conectadas en sus esquinas con tornillos. Al girar estos tornillos, es posible nivelar la placa superior, estando la placa inferior fijado sobre un trípode. Para llevar a cabo la nivelación y centrado del equipo montado, la base nivelante contiene un nivel de burbuja circular y una plomada que puede ser óptica, electrónica o laser.

Para este proyecto particular, la base nivelante tiene una sensibilidad de nivelación circular de 10^{-2} mm y plomada óptica fija.

Por sensibilidad se entiende el cambio de ángulo o gradiente $\Delta\theta$ requerido para mover la burbuja de nivel una distancia determinada (generalmente 2 mm).

Finalmente el pedestal queda compuesto por tres pies regulables para nivelar el pedestal según el terreno en el que haya sido colocado. De este modo se posee una

etapa de nivelación grueso por los pies, y otra de precisión dada por la base nivelante.

2.2. Etapa de Visión

La cámara de filmación es una Sony DCR-SR68, con distancia focal variable por el usuario. La señal de video compuesto proveniente de la cámara es digitalizada por medio de una placa PCI-1409 de National Instruments y luego procesada por el algoritmo de seguimiento de imágenes en una computadora.

La cámara de filmación adquiere imágenes a 30 cuadros por segundo (fps) posee una relación de aspecto de video de 16:9 en *Standard Resolution*, y distancia focal variable (zoom óptico) de hasta 60x. El campo de visión de la imagen, IFOV por sus siglas en inglés, se determinó experimentalmente para máximo zoom (menor FOV) en los siguientes valores:

$$IFOV_H = 20.5 \pm 0.2 [\mu\text{rad/pixel}] \quad (1)$$

$$IFOV_V = 17.3 \pm 0.2 [\mu\text{rad/pixel}] \quad (2)$$

La relación ángulos/píxeles se modelizó de manera lineal en el rango $\times 1$ a $\times 60$ de zoom de acuerdo al valor que comanda el usuario.

2.3. Caso de análisis

A continuación se describe la importancia de la sensibilidad de la base nivelante. Para hacer este análisis se va a considerar la situación más desfavorable posible. Es decir, el móvil más pequeño del que se pueda tratar y la máxima distancia a la que se podría encontrar dicho móvil utilizando la máxima capacidad posible del sistema óptico es decir con zoom óptico máximo (60x).

Escenario: se selecciona como móvil a un UAV (longitud aproximada de 3[m] y alto aproximado de 0.5[m] que está volando a 10[Km] de distancia de la cámara.

Teniendo en cuenta el HFOV y VFOV de la cámara, y que la resolución de video de la cámara es 720 x 480:

$$\text{ancho del pixel} = IFOV_H \times 10000 = 0.205 \text{ m} = 20.5 \text{ cm}$$

$$\text{alto del pixel} = IFOV_V \times 10000 = 0.173 \text{ m} = 17.3 \text{ cm}$$

Es decir que 1 pixel (amorfo) corresponde a una superficie de 20.5cm x 17.3 cm a una distancia de 10000m

Respecto a la base nivelante, tenemos que una sensibilidad de 10^{-2} mm resulta en un $\Delta\theta = 2.91 \text{ mrad}$, Por lo tanto a una distancia de 10000 mts tenemos una desviación de:

$$\pm 29.1 \text{ m} \cong \pm 30 \text{ m}$$

Para visualizar esto, se puede presentar la fig.2 donde se muestra la posición correcta donde debería verse el móvil (en el centro de la pantalla) y las posiciones probables resultantes de la máxima desviación debido a la falta de precisión de la base nivelante. Esto es para el peor de los casos que es cuando el error de precisión de la base nivelante se encuentra justo en la dirección de observación de la cámara.

La figura muestra las divisiones correspondientes a 720 x 480px y el móvil es proporcional a esta escala.

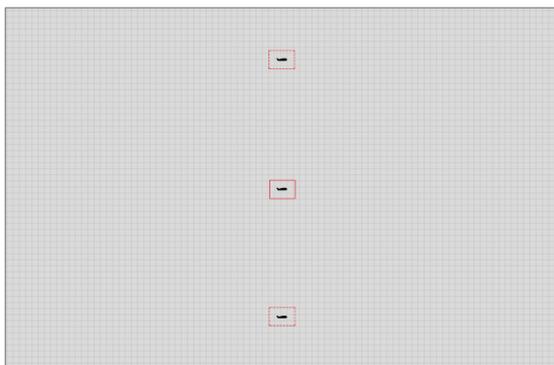


Figura 2: resolución máxima alcanzable.

2.4. Algoritmo de Procesamiento de Imágenes

Para la ley de comando de la plataforma de seguimiento óptico se implementó el algoritmo ajustable de seguimiento con equiparado de patrón (máscara) expuesto en [4] cuya efectividad ya ha sido ensayada.

El algoritmo de seguimiento consta de cuatro etapas secuenciales. Primero se localiza la posición de mejor correspondencia entre el área de interés de la imagen y el patrón (máscara) determinado en la muestra anterior, minimizando una función de energía espacial.

Después, se calculan coeficientes de corrección de tamaño de ventana y centrado del objeto considerando características de bordes de la imagen en la región próxima a la posición determinada en el paso anterior.

A continuación, se realiza un filtrado del resultado obtenido, modificado con los coeficientes de actualización y por último, se recalcula el patrón para la próxima iteración. Fue necesario optar por máscaras de tamaño fijo de 31x31 píxeles para optimizar el procesamiento y lograr así su funcionamiento en tiempo real. [5]

2.5. Etapa Telemétrica GNSS-GPS

El seguidor E-O incorpora también la posibilidad de utilizar como referencia un sistema GPS (Global Positioning System) inercial, montado en el objetivo a seguir, que transmite información de su posición compuesta por las coordenadas de latitud, longitud, y altitud, adjuntada a una trama de telemetría. Esta información recibida en tierra permite robustecer el seguimiento de los blancos posibilitando la continuidad en el seguimiento, ante la ocurrencia de oclusiones totales prolongadas, y provee además datos iniciales útiles para el proceso de pre-apuntado en el cual se localiza el blanco por primera vez.

El enlace de datos de telemetría proveniente del GPS se realiza utilizando de dos módulos radio-modem LAIRDTECH CL4790 que se comunican mediante un protocolo serie a 5600 baudios en configuración peer-to-peer.

El módulo remoto cuenta con una unidad de GPS inercial *Xsense* MTI-G que transmite la trama telemétrica que contiene la información de latitud, longitud y altitud (WGS-84) codificada en el estándar IEEE-754 de 32 bits. La información de coordenadas geodésicas es actualizada a una tasa de 25Hz y es

contenida en una trama que incluye doble verificación de protocolo con el fin de evitar el procesamiento de información errónea en etapas posteriores de operación.

2.6. Proceso de Geo-Referenciamiento

Para que la plataforma de seguimiento sea capaz de interpretar correctamente las coordenadas enviadas por el GPS del móvil es necesario llevar a cabo con antelación a los ensayos el proceso de geo-referenciamiento basado en establecer la posición del norte geográfico y el plano horizontal.

Para establecer la posición del norte geográfico de la plataforma con el cero de la plataforma, se calcula el ángulo a descontar partiendo de la medición de las coordenadas de la plataforma y de otro punto distante de la plataforma que es enfocada de manera de estar centrada en el cuadro de la imagen. Para determinar el plano horizontal, debe determinarse el plano de rotación sobre el cual ha sido montado el sistema, que en la mayoría de los casos no es el plano perpendicular a la vertical de la plataforma debido a la relativamente poca precisión de la base nivelante. Para esto, deberá agregarse las coordenadas de un tercer objeto centrado en la imagen de la cámara. De este modo quedará definido el plano centrado en la plataforma que contiene los tres (3) puntos (posición propia, el anterior y el más reciente). La intersección de este plano con un cilindro centrado en las coordenadas del pedestal definirá una curva centrada en la plataforma de seguimiento que permitirá parametrizar la corrección en elevación necesaria con respecto al plano horizontal según el valor del ángulo en azimut.

La fig.3 muestra un ejemplo de la curva de corrección obtenida, centrada en la plataforma respecto al horizonte real.

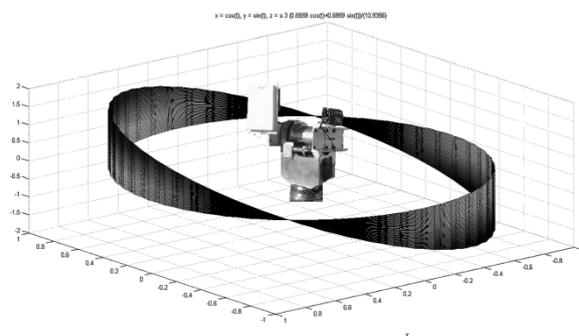


Figura 3: curva de corrección para el horizonte artificial.

2.7. Consideraciones sobre Sistema GPS

Como es sabido, la precisión en la estimación de la posición global de un objeto mediante información de GPS, depende de varios factores entre los que se destaca principalmente el número de satélites disponibles en el momento. De los tres parámetros que definen la posición de un punto del espacio, el menos preciso resulta ser la altitud. La figura 10 muestra la variación de éste parámetro a lo largo de un ensayo. Esta incertidumbre también se cumple, con menor dispersión, en los parámetros de latitud y longitud.

Esta dispersión en los valores de las posiciones debe ser tenida en cuenta con el fin de alcanzar la precisión necesaria para lograr el registro de imágenes de los blancos, donde el ángulo de visión es de aproximadamente un grado de arco.

2.8. Consideraciones sobre el seguimiento por imágenes

El sistema de seguimiento por imágenes es altamente preciso ya que el ángulo de visión se encuentra discretizado a la porción angular que corresponde a un pixel (valor variable según las características de la cámara). Sin embargo esta discriminación del espacio carece de una referencia absoluta dado que falta la información "distancia al objetivo". Es decir que el seguimiento por imágenes sólo es posible dentro del rango de visión. Si el blanco se encuentra fuera del campo de visión (FOV) se deberá re-apuntar para volver a realizar el seguimiento. También puede suceder que la imagen del blanco se vea obstruida temporalmente por algún obstáculo, como por ejemplo nubes, árboles, terreno, o simplemente se aleje más allá del alcance visual de la cámara. En estos casos, la información proporcionada por el sensor óptico se ve interrumpida y para poder continuar el seguimiento es imprescindible contar con datos aportados por otro tipo de sensor.

2.9. Fusión Sensorial

Para mejorar la precisión lograda a partir del sistema GPS es deseable que los puntos de referencia utilizados se encuentren espaciados en sentido angular, por ende se actualizan iterativamente las posiciones de dichos puntos durante el seguimiento. Este proceso es posible debido a que la información para el apuntado se calcula de manera independiente en base a la información del procesamiento de imágenes y de la información basada en la recepción de GPS.

Además se incorpora un sistema estimador de trayectoria a partir de las coordenadas GPS recibidas, con el fin de lograr una estimación óptima que está disponible cuando la máscara de seguimiento no pueda detectar (por obstrucción, lejanía, etc.). En la actualidad, el estimador utilizado es un filtro de Kalman en el que la correlación entre los dos estados del pedestal azimuth-elevación obtenidos por seguimiento por imágenes y por información de GPS se consideran nulas. [6][7]

2.10. Estrategia de Control

La estrategia de control que se ensayó se basa en la realimentación de estado de velocidad, tal como se propuso Murao, T. et al en el trabajo "Predictive Visual Feedback Control with Eye-in-Hand System via Stabilizing Receding Horizon Approach" [8]. El estimador de estado (tracking filter) se basa en implementar una ley de control de seguimiento similar al de la conducción de un automóvil (Car-following Control Law) [9] que surge de imitar cómo un conductor corrige la velocidad de su automóvil en función de la distancia (posición) al vehículo delante de él:

$$V_{n+1} = V_n + f(d) \quad (3)$$

donde V representa la velocidad en los instantes n y el siguiente $n+1$, y $f(d)$ es una función de la distancia en pixeles del centro de la máscara al centro de la pantalla.

Se decidió utilizar un algoritmo PID como estimador, ya que este cumple con dos requisitos vitales: robusto (estable) y fácilmente modificable [10][11].

2.11. Programa de control implementado

Dado que las señales de comando a los servomotores que controlan azimuth y elevación se implementan en base a diversas fuentes complementarias de información para cumplir una tarea específica se consideró conveniente que el Programa que controla a los motores se implemente de módulos independientes, agrupados de acuerdo a su tarea, y que la información resultante de un módulo del programa sea comunicada al módulo que la requiera. De este modo se logra que el problema general se simplifique, y por lo tanto también lo hagan el proceso de purificación y de modificación (evolución) para un siguiente desarrollo u optimización. Además cada módulo se procesa según una estructura de interrupciones que permite se optimicen los recursos de cómputo para cada tarea, liberando recursos de la computadora. El software es íntegramente desarrollado en LabVIEW.

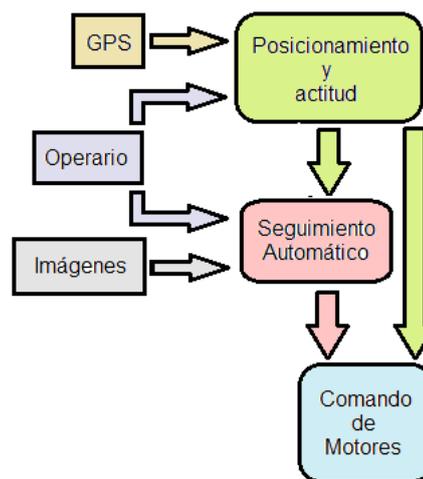


Figura 4: diagrama de los bloques del programa TV Tracker.

2.12. Ensayos

En el primer ensayo se logró un registro ininterrumpido de 6,842 minutos del vuelo de un avión comercial en su ruta aérea. El blanco fue primeramente avistado en el cenit de la montura y se hizo el seguimiento automático por imágenes hasta que desapareció detrás de unos árboles a unos 15 grados sobre el horizonte.

Las imágenes en fig. 5 muestran dos de las instancias del seguimiento. En la imagen de la derecha se muestra el avión centrado a lo largo del ensayo con máximo zoom. En la imagen de la izquierda se observa el máximo deterioro de la máscara durante el ensayo, antes de que se obstruyera la visibilidad del blanco por los árboles.

La fig. 6 muestra una secuencia de cuadros en los que la máscara de seguimiento es obstruida por unos breves

instantes por pájaros en vuelo en la línea de visión de la cámara con el avión sin impedir la operación sin ningún inconveniente para el desarrollo del ensayo.

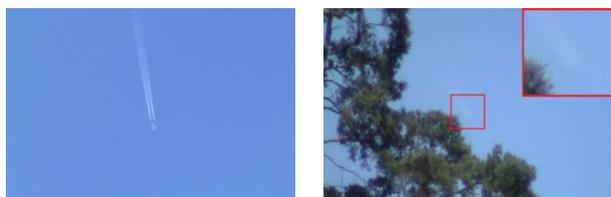


Figura 5: Captura del primer ensayo, y últimas capturas previo a la oclusión (izq.).



Figura 6: Secuencia de oclusión temporal del objetivo en pleno seguimiento

Para comprobar el funcionamiento de la plataforma de seguimiento con los datos proporcionados por el sistema GPS, se realizó un ensayo cuyo objetivo fue evaluar la velocidad de pre apuntado o apuntado inicial y la capacidad de seguimiento del sistema ante la ocurrencia de oclusiones de distinta duración. El ensayo contó con dos etapas: en la primera se realizaron maniobras de detección de objetivo, con y sin información de GPS, y en la segunda se hicieron tres ejercicios de seguimiento continuo con oclusiones totales del objetivo de duración variable. Para todos estos ensayos se utilizó como blanco u objetivo a seguir un módulo de transmisión construido para tal efecto con el sistema GPS-inercial Xsense MTI-G que era trasladado por un voluntario (fig. 8).

En el ensayo, el módulo transmisor fue trasladado realizando distintas trayectorias con períodos visibles y ocluidos de distinta duración (fig. 7). A lo largo de las trayectorias fue posible mantener el objetivo dentro del campo visual de la cámara (FOV) incluso durante las oclusiones (Fig. 9). Nuevamente el mayor error durante las etapas de seguimiento sin contacto visual, se encontraba en la información de altitud. Durante la oclusión de mayor duración (de 24 minutos aprox.) fue necesario disminuir el zoom (aumentar el FOV) para mantener el objetivo dentro del campo visual. En todas las oclusiones la altitud estimada aumentaba en forma monótona mientras el objetivo se mantenía a la misma altura, alcanzando un error máximo de 17.36 metros (Fig. 10).

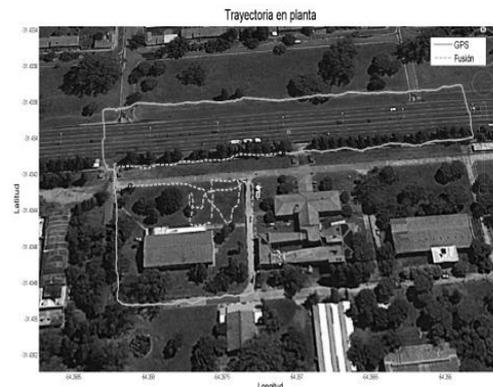


Figura 7: Trayectoria con fusión de datos y trayectoria con información GPS únicamente



Figura 8: Módulo centrado durante una de las trayectorias.



Figura 9: El blanco permanece en FOV durante la oclusión.

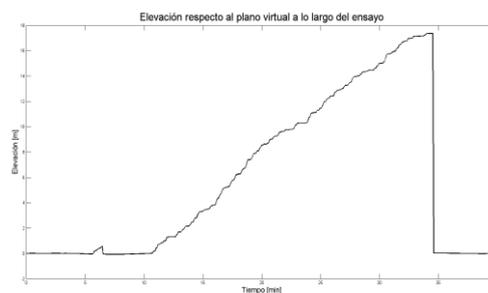


Figura 10: Acumulación de error en la altitud durante las oclusiones.

3. CONCLUSIONES

Con la incorporación de información de posicionamiento global, el sistema TV Tracker logró continuar el seguimiento del objetivo sin dificultades a

pesar de la pérdida del contacto visual con el mismo por periodos prolongados de tiempo. También se advirtió un error acumulativo en la altitud estimada por el sensor GPS-inercial que podría afectar el correcto funcionamiento del sistema ante la ocurrencia de oclusiones de duración mayor a 24 minutos, especialmente cuando el objetivo se desplaza en las cercanías de TV Tracker.

En etapas futuras del proyecto se espera repetir este ensayo con un blanco aéreo para profundizar sobre el modelo de fusión y la teoría de decisión a implementar en el futuro. Además se prevé estudiar el comportamiento del sistema ante la incorporación de otro tipo de sensores (IMU, radar, etc).

REFERENCIAS

- [1] Downey, George, and Larry Stockum. "Electro-optical tracking systems considerations." 1989 Orlando Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1989.
- [2] Kaiser, M. K., N. R. Gans, and W. E. Dixon. "Vision-based estimation for guidance, navigation, and control of an aerial vehicle." Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on 46.3 (2010): 1064-1077..
- [3] Hu, Zhencheng, et al. "Fusion of vision, 3D gyro and GPS for camera dynamic registration." Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on. Vol. 3. IEEE, 2004..
- [4] Curetti, Maria; Garcia Bravo, Santiago; Arri, Gabriela S.; Mathe, Ladislao, "Adjustable Tracking Algorithm with Adaptive Template Matching," Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina) , vol.11, no.1, pp.34,39, Feb. 2013 doi: 10.1109/TLA.2013.6502774
- [5] Curetti, María, et al. "Fast Tracking Algorithm with Borders 1-D Histogram Correlation." Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 615-623.
- [6] Jurado, Juan, Kenneth Fisher, and Michael Veth. "Inertial and imaging sensor fusion for image-aided navigation with affine distortion prediction." Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION. IEEE, 2012
- [7] Wang, Xiaogang, Naigang Cui, and Jifeng Guo. "INS/VisNav/GPS relative navigation system for UAV". Aerospace Science and Technology (2012).
- [8] Murao, T.; Yamada, T.; Fujita, M., "Predictive Visual Feedback Control with Eye-in-Hand System via Stabilizing Receding Horizon Approach," Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on , vol., no., pp.1758,1763, 13-15 Dec. 2006 doi: 10.1109/CDC.2006.376702
- [9] Ahmed, Javed, M. N. Jafri, Mubarak Shah, and Muhammad Akbar. "Real-time edge-enhanced dynamic correlation and predictive open-loop car-following control for robust tracking." Machine Vision and Applications 19, no. 1 (2008): 1-25.
- [10] Dean-Leon, E.C.; Parra-Vega, V.; Espinosa-Romero, A.; Fierro, J., "Dynamical image-based PID uncalibrated visual servoing with fixed camera for tracking of planar robots with a heuristical predictor," Industrial Informatics, 2004. INDIN '04. 2004 2nd IEEE International Conference on , vol., no., pp.339,345, 26-26 June 2004.
- [11] Wei Tang; Mengxiao Wang; Yuyan Chao; Lifeng He; Itoh, H., "A Study on the Internal Relationship among Smith Predictor, Dahlin Controller & PID," Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on , vol., no., pp.3101,3106, 18-21 Aug. 2007.