



Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana
de Inteligencia Artificial

ISSN: 1137-3601

revista@aepia.org

Asociación Española para la Inteligencia
Artificial
España

Sanchez, Francisco M.; Aracil, Rafael; Sebastián, José M.; Garcia, David
Detector de colisiones para un sistema robotizado teleoperado para trabajos en tensión mediante
visión artificial
Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, vol. 4, núm. 10, verano, 2000,
pp. 59-66
Asociación Española para la Inteligencia Artificial
Valencia, España

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92541006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Detector de colisiones para un sistema robotizado teleoperado para trabajos en tensión mediante visión artificial.

Francisco M. SANCHEZ, Rafael ARACIL, José M. SEBASTIÁN, David GARCIA

UPM-DISAM E.T.S.I.I C/ José Gutierrez Abascal 2, 28006 Madrid
fsanchez@disam.upm.es
<http://www.disam.upm.es/en/grupos/vision/proyectos/robtet/robtet.html>

Resumen:

Hoy en día el suministro ininterrumpido de energía eléctrica se ha convertido en casi una obligación para las compañías eléctricas, debido al avance tecnológico que cada vez está mas presente en la sociedad y que conduce a un mayor consumo. Esta necesidad ha obligado a desarrollar procedimientos y técnicas para el mantenimiento de instalaciones en tensión, cuya mayor aplicación se encuentra en líneas aéreas de distribución. En este artículo se presenta el ROBTET (Robot Teleoperado para Trabajos en Tensión), un sistema teleoperado desarrollado por UPM-DISAM, con el que se puede realizar todo tipo de tareas de mantenimiento, inspección y reparación de líneas eléctricas en tensión. Este procedimiento es llevado a cabo en la actualidad por personal especializado, con protecciones para trabajos en tensión. Además del alto riesgo para los operarios que realizan este tipo de trabajos, el coste para las compañías eléctricas es muy elevado. Una próxima normativa comunitaria prevé la eliminación de este tipo de operaciones, lo cual hace imprescindible recurrir a un sistema como el presentado en este artículo. Se comienza con una descripción detallada del proyecto, haciendo especial hincapié en el sistema de visión, que aglutina un esfuerzo de varios años de investigación en el campo de la visión artificial. En la bibliografía se puede encontrar referencias de otras partes del proyecto explicadas con mayor detalle.

Palabras clave:

Detección de colisiones, Teleoperación, Visión Artificial, Visión Estéreo, Fotogrametría,

1 Introducción.

El presente trabajo se ha desarrollado en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISAM), perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid (ETSIIM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

El sistema consiste principalmente en dos robots teleoperados con seis grados de libertad, con los que se manipula líneas eléctricas en tensión para su mantenimiento. Estos están montados en una barquilla que es elevada con un brazo telescópico

hasta la parte superior de la torre eléctrica. El conjunto está instalado en un camión todo terreno.

El operario manejará los robots desde una cabina de control en el camión mientras que el sistema teleoperado se encuentra a varios metros por encima de su cabeza. De esta manera se obtiene como ventaja principal la eliminación total del riesgo a sufrir daños, por parte del trabajador, así como la simplificación de sus funciones, ya que muchas tareas de reparación y mantenimiento se realizan de forma automática. El equipo de visión se puede dividir en dos partes:

Sistema de inspección visual del operario. Al no disponer por parte del operario de una visión clara

de la tarea que se está realizando, por no encontrarse físicamente en la escena, se han instalado dos cámaras con las que este supervisa la operación. La primera cámara está situada en el brazo izquierdo del robot y sirve principalmente para que el operario visualice las operaciones que realiza con el brazo derecho del robot. La segunda cámara está situada sobre una unidad *pan-tilt*, y dispone además de óptica motorizada con control de zoom, enfoque e iris. Ya que el operario tiene ocupados los dos brazos manejando los dos robots, la cámara móvil se gobierna mediante un sistema de reconocimiento de voz desarrollado por la E.T.S.I.T de la U.P.M., nombrando simplemente los puntos determinados a los que quiere mirar.

Sistema de detección de colisiones. Se cuenta también con un sistema de visión artificial compuesto básicamente de un cabezal estereoscópico y un plano láser direccionable. Su función es supervisar de forma automática que no se produzcan colisiones entre los robots y los cables para evitar un posible cortocircuito. Los problemas principales que se han encontrado al utilizar un sistema de visión es en primer lugar la eliminación del ruido solar, y en segundo lugar la velocidad de detección de los puntos que forman el cable. Este tema es especialmente importante debido a que la posición espacial de los cables de alta tensión debe conocerse en todo momento para evitar que cualquier acción, voluntaria o involuntaria por parte del operario, conduzca a los robots a un desastre. El conjunto del sistema puede ser considerado como semiautomático con el operador en el suelo. En una primera fase se ha conseguido en cierta medida un control supervisado, siendo el objetivo final el conseguir un control cercano al totalmente automático. Este modo de operación tiene las ventajas de protección, seguridad del operario y rapidez, además de las que un sistema semiautomático aporta sobre uno manual, limitando a su vez las desventajas que un sistema automático introduce en cuanto a complejidad del control y al coste.

2 Estructura del sistema.

2.1 Estructura general.

El sistema ha sido diseñado para realizar tareas de mantenimiento y reparación en redes de distribución de hasta 49kv. La arquitectura se pensó con el objetivo principal de que el operador realice las tareas de manera correcta y en el tiempo mas breve posible, así como para conseguir la máxima



Figura 1: Sistema ROBTET

telepresencia posible para así mejorar su rendimiento.

Camión, 5.5 ton, 8 m de longitud. Grúa, 15m longitud, telescópico y hasta 69kv de resistencia dieléctrica. Cabina, Montada sobre el chasis del camión, cercana a la cabina del mismo. Incluye el puesto del operador con el elevador, plumín y estación de control de manipulación. Robots, Hidráulicos, 7 funciones (6 ejes + pinza), articulado. Maestros con reflexión de esfuerzo, máxima carga 45 kg/brazo, peso neto 60 kg/brazo. Plumín, Hidráulico, 3 GDL, telescópico, capacidad de elevación: 200 kg, con cabrestante. Plataforma rotativa, Montada en lo alto del elevador. Soporta los manipuladores (esclavos), el plumín y el sistema de visión. Sistema de visión, Cabezal estéreo, telémetro láser, y tarjeta procesadora en tiempo real.

El núcleo del sistema está formado por tres partes: *HIC*, computador de interacción con el ser humano. *TIC*, computador de interacción con la tarea. *SPC*, computador de proceso de sensores. El *HIC* tiene como misión interactuar con el operador para así poder cerrar el bucle de control. El *TIC* recibe comandos del *HIC*, los procesa e interactúan con los elementos situados en la zona remota para poder así realizar la tarea. El último, el *SPC*, tiene como función procesar la información de los sensores remotos. Una descripción más detallada de la arquitectura puede ser encontrada en [Aracil95], [Aracil96], [Sánchez98b], [Santamaría97] y [Santamaría96]. La comunicación entre los distintos

módulos se realiza por red ethernet, mientras que entre el *TIC* y el *SPC* se realiza mediante bus *VME*.

2.2. Estructura del sistema de visión.

A continuación se enumeran los distintos componentes del sistema detector de colisiones que en su conjunto forman lo que se ha denominado *SPC*.

Cabezal estéreo TRC con óptica motorizada. Es un cabezal robotizado construido por la firma estadounidense *TRC* (actualmente *HelMate Robotics Inc*). Este sistema está dirigido por una tarjeta controladora de 8 ejes *PMAC* sobre bus *VME*. El cabezal dispone de cuatro grados de libertad principales, giro en acimut o *Pan*, elevación o *tilt* y convergencia de cada cámara. Además dispone de ópticas motorizadas *Fujinon*, las cuales permiten controlar el *zoom*, enfoque y apertura [Jiménez95].

Tarjeta procesadora de imágenes Datacube mv200. Es un digitalizador y procesador de imagen en tiempo real en arquitectura *pipe-line*. Va montado en bus *VME* con un ordenador 68.000 de *Motorola* bajo sistema operativo en tiempo real *Lynx 2.0*

Procesador en coma flotante mp860. Es una tarjeta de expansión en bus *VME* para el procesador *pipe-line Datacube*. Este en concreto permite operaciones matemáticas en coma flotante con una capacidad de 80 *Mflops*. Es programable con un compilador *High C* y trae una gran cantidad de librerías de funciones matemáticas, que se pueden implementar. Una vez programada la operación matemática que se desea, se puede hacer pasar las imágenes a través de ella. Esta tarjeta junto con la *mv200* y la tarjeta procesadora *M 68.000* formarían el núcleo del *SPC*.

Escáner láser de 810 nm. Este equipo ha sido desarrollado por la Universidad Carlos III de Madrid y consta de un línea láser, generada por un láser semiconductor de 500 *mW* de potencia y una lente cilíndrica. Esta se puede dirigir a donde se desee mediante un espejo solidario a un galvanómetro. El control del motor se realiza a través de un puerto serie. Además realiza un barrido pudiendo programar el ancho de apertura, ángulo máximo y mínimo. También el encendido y apagado del láser se realiza de manera automática o de manera sincronizada con la frecuencia de integración de las cámaras del cabezal estéreo. Es de destacar que se ha tenido en cuenta las normas de seguridad de equipos láseres recogidas en la normativa *UNE* [Aenor93].

3 Desarrollo del proyecto.

3.1 Problemas tecnológicos y soluciones aportadas.

El problema principal de la detección espacial del cable es que no se dispone de ningún punto significativo de este para poder realizar una correspondencia. El calibrar un cabezal estéreo con precisión y realizar una segmentación del cable para su localización espacial, es una técnica que se ha realizado en el laboratorio con luz controlada, pero al llevarlo a cabo con luz solar y en un equipo montado en un camión, no se han conseguido los resultados esperados. Otro factor a tener en cuenta es que el cable se encuentra prácticamente paralelo a la línea epipolar, aumentando esto la imprecisión, ver (Xu96). Para resolver este problema se recurre a la visión activa, iluminando con una línea láser, de modo que su intersección con el cable eléctrico consiga un punto iluminado que pueda ser visto por las dos cámaras del cabezal estéreo. Este punto será extraído de cada una de las dos imágenes y finalmente se calculará la correspondencia. Obteniendo una nube puntos se podría interpolar la situación del cable eléctrico, creando así una zona de seguridad en la cual se prohibirá el acceso al robot.

El siguiente problema a resolver es el ruido proveniente de la luz solar. Las condiciones de trabajo obliga a que el sistema pueda estar afectado por fuerte iluminación solar, bastante abundante en nuestro país. Debería poder incluso trabajar a contraluz. Esto hace que cualquier luz estructurada que se aplique se haga inapreciable. Para resolver este nuevo problema se puede actuar sobre la potencia de la fuente de luz artificial y sobre su longitud de onda. El sol, aunque se comporta prácticamente como un cuerpo negro, presenta un descenso de su densidad de energía en el infrarrojo, siendo este descenso mayor cuanto mayor sea la longitud de onda. Lo malo de elegir una longitud de onda muy elevada es que tanto el coste de las cámaras del cabezal estéreo como el del láser se disparan. Además para longitudes de onda de más de 900nm no existen hoy por hoy cámaras *CCD* ni láseres de estado sólido, con lo cual se tendría que ir a otras tecnologías que aparte del mayor coste implicarían un mayor volumen haciéndolo inviable.

Finalmente la solución de compromiso fue un láser de 810 nm con una potencia de salida de 200 *mw*. Se utilizan cámaras económicas *Hitachi KP-160* con unos filtros de 810 nm con una banda pasante ± 10 nm. Con este sistema se obtiene un punto reflejado sobre el cable suficientemente nítido

incluso en condiciones de luminosidad solar muy fuertes.

3.2 Funcionamiento del sistema de visión.

En la maniobra de aproximación de la plataforma donde se encuentran los robots y el sistema de visión, este empieza a detectar lo que tiene justo enfrente. En cuanto el cable es localizado espacialmente las coordenadas tridimensionales de este son pasadas a la base de datos que almacena el modelo de alambre del entorno sobre el que se está trabajando. El robot en cada uno de sus movimientos orquestados por el operario, deberá comprobar si su trayectoria es compatible con el modelo de la base de datos y que no se producirá ninguna colisión permitida.

El operario podrá habilitar e inhibir zonas para que el robot no las pueda tocar por accidente. Esta operación la realizará con el interfaz de usuario mediante voz, ya que el operario tendrá ocupado en todo momentos los dos brazos manejando los maestros de los dos robots.

El láser se enciende y apaga síncronamente con la cámara de manera que permanece encendido durante los cuadros pares y se apaga durante los impares. De esta manera el equipo DATACUBE puede procesar las dos imágenes, y detectar donde se ha producido la variación. El punto iluminado por el láser es detectado en ambas imágenes, cámara izquierda y derecha, y las coordenadas de la cámara se pasan al sistema mp860 que calcula la correspondencia. Este proceso se realiza 25 veces por segundo. Se han implementado dos estrategias de detección, comenzando con un barrido grande, para finalmente hacer un barrido más selectivo sobre la zona que está siendo vista por las cámaras.

4 Algoritmo de detección de colisiones.

4.1 Estrategia de adquisición de imágenes.

Se han implementado dos estrategias de detección como ya se adelantaba en el punto anterior. Siempre se comienza por la estrategia uno, y una vez que está detectado el cable se pasa a la estrategia dos. Si por cualquier motivo el sistema de detección de colisiones estuviera fallando, en la pantalla del operador aparecería una alarma, indicándole que las operaciones no son del todo seguras y que debe extremar las precauciones.

Primera estrategia el cabezal estéreo se mueve de manera continua de izquierda a derecha, realizando una secuencia de barrido en sentido horizontal. La posición del láser sigue en todo momento el campo visual de las dos cámaras que permanecen fijas con un pequeño ángulo de convergencia. En el transcurso de este movimiento el sistema de visión ira captando puntos correspondientes al cable de alta tensión. Los puntos serán calculados en tiempo real mediante el algoritmo que se explica en este punto.

Segunda estrategia, el cabezal permanece inmóvil y es el láser el que realiza un barrido horizontal dentro del ángulo de visión de las cámaras. Al igual que en el caso anterior los puntos serán calculados en tiempo real y las coordenadas serán pasadas a la base de datos del TIC.

4.2 Calibración del sistema de visión.

La calibración de cualquier sistema de visión es vital a la hora de obtener precisión. Para el cabezal estéreo con óptica motorizada empleado, se ha realizado una tabla de calibraciones, teniendo en cuenta distintas posiciones de zoom y enfoque. Debido a que la distancia de trabajo es constante, estando determinada aproximadamente por la longitud de los brazos de los robots, las cámaras van a estar más o menos a la misma distancia del cable, siendo únicamente necesario hacer pequeñas correcciones del enfoque mediante un sistema de enfoque automático explicado en detalle en [Jiménez95].

Ya que el cabezal va a estar realizando movimientos horizontales de izquierda a derecha, una calibración cinemática se hace necesaria [González96]. A continuación se explica el método utilizado para la calibración de las cámaras así como la calibración cinemática.

4.2.1 Métodos.

La calibración de ópticas motorizadas no es tan sencilla como la de una óptica fija. La lente puede ser considerada como un modelo matemático pin-hole en una posición determinada de zoom, enfoque y apertura, pero modificando cualesquiera de estas variables los parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo se ven alterados, debidos fundamentalmente al desplazamiento que sufre el centro de la imagen. Un excelente trabajo que describe esta problemática puede ser encontrado en [Wilson94] y [González96].

El modelo matemático empleado es el de *pin-hole* descrito con detalle en infinidad de referencias

bibliográficas [Tsai87], [Li94], [Wilson94] y [Gonzalez96].

Parámetros intrínsecos. La proyección del punto P sobre el plano del CCD viene descrita por (1) donde (x,y,z) son las coordenadas de P respecto al centro óptico, y (x_w, y_w, z_w) son las coordenadas de P respecto a las coordenadas del mundo. (x_u, y_u) son las coordenadas en el CCD en milímetros sin distorsión, referidas al punto principal, con el mismo origen, (x_d, y_d) son las coordenadas con distorsión y finalmente (x_f, y_f) representaría las coordenadas laterales ya en pixeles. La transformación espacial viene definida por la matriz de Rotación $[R]$ que sus 9 parámetros son funciones de los tres ángulos de giro efectuados. Los otros tres parámetros de la traslación $[T]$, corresponden a los desplazamientos en los tres ejes de las coordenadas del centro óptico.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad T \equiv \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad R \equiv \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La relación entre el sistema de coordenadas de la cámara y las coordenadas en el plano de la imagen vienen dadas por (2), donde el parámetro f es la distancia focal de la cámara.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{X_u}{f} = \frac{x}{z} \\ \frac{Y_u}{f} = \frac{y}{z} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{cases} X_u = f \frac{x}{z} \\ Y_u = f \frac{y}{z} \end{cases} \rightarrow \begin{pmatrix} nX_u \\ nY_u \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Las coordenadas con distorsión se obtendrán según (3), donde D_x y D_y representan las distorsiones tangenciales y radiales en cada dirección.

$$\left. \begin{array}{l} X_d + D_x = X_u \\ Y_d + D_y = Y_u \end{array} \right\} \rightarrow \begin{pmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -D_x \\ 0 & 1 & -D_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Para pasar de coordenadas en milímetros a coordenadas en pixeles deberemos multiplicar por un factor de escala K_x y K_y , así como realizar un desplazamiento del punto principal C_x, C_y (4).

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_x & 0 & C_x \\ 0 & K_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Finalmente se obtiene las coordenadas laterales en función de los parámetros intrínsecos y extrínsecos del sistema (5) y (6).

$$Y_f = C_x - K_y D_y + K_y f \frac{r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_y}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_z} \quad (5)$$

$$Y_f = C_x - K_y D_y + K_y f \frac{r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_y}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_z} \quad (6)$$

Proceso de calibración. Varios algoritmos han sido probados para la obtención de los parámetros intrínsecos y extrínsecos. Entre ellos cabe destacar el método Tsai [Tsai89], [Tsai87], el método DLT [Fan93] y el método de Punto de desvanecimiento [Wang91], [Chen91], [Magee84] y un resumen de todos en [Gonzalez96]. Para la calibración definitiva del cabezal se han utilizados la implementación del algoritmo de Tsai de Reg Wilson [Wilson94] de la universidad Carnegie Mellown, aunque últimamente se ha estado utilizando la implementación también del Tsai de Janne Heikkilä [Heikkilä97], [Heikkilä96], de la universidad de Oulu en Finlandia. En ambos casos se han obtenido los mejores resultados que se expondrán mas adelante.

4.2.2 Calibración cinemática.

En los sistemas activos de visión los parámetros intrínsecos y extrínsecos cambian cuando se varía la posición y/o estado de la cámara. Son necesarias técnicas de calibración que mantengan en todo momento el sistema calibrado. Los parámetros intrínsecos serán modificados en función de la posición del cabezal, tanto en elevación, convergencia y acimut, formando una serie de tablas en las que se consulte los nuevos parámetros [Li94]. Otros autores proponen la creación de formulas matemáticas que consigan los parámetros en función del zoom, enfoque y apertura del iris.

El problema del conocimiento continuado de los parámetros extrínsecos se resuelve mediante la obtención previa de una serie de matrices de transformación, que relacionan el sistema de coordenadas de la cámara situado en el centro de proyección, y los sistemas de coordenadas que definen los ejes de rotación del cabezal. Conociendo los parámetros extrínsecos para una posición inicial del cabezal, en la que hemos calibrado inicialmente, y habiendo obtenido previamente todas las relaciones de transformación entre los diferentes sistemas de coordenadas puede disponerse en todo momento de los parámetros extrínsecos de las cámaras.

En la figura 2 se puede ver la estructura de un cabezal estéreo en la se definen los siguiente sistemas de coordenadas:

$W-x_w y_w z_w$	S.C. del mundo.
$N-x_n y_n z_n$	S.C. del cuello.

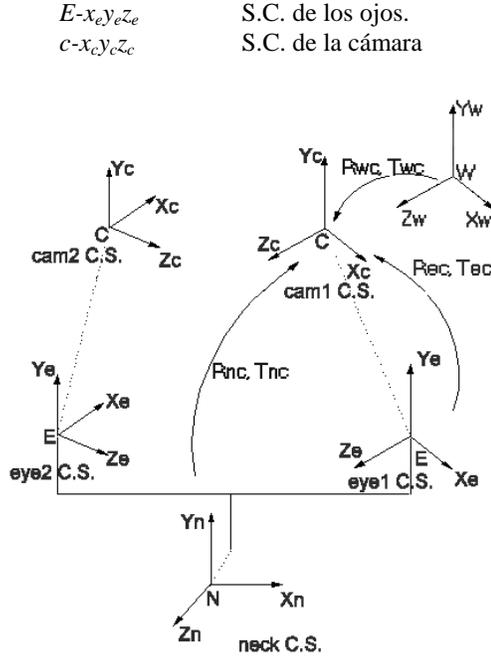


Figura 2: Cinemática del cabezal estéreo.

En (7) se plantean las relaciones existentes entre el sistema de coordenadas del Ojo y de la Cámara.

$$\begin{aligned} X_c^o &= R_{ec}^o X_e^o + T_{ec}^o & (7) \quad X_e^o &\alpha X_e^1 \quad X_c^o \alpha X_c^1 & (8) \\ X_c^o &= R_{wc}^o X_w^o + T_{wc}^o & X_e^1 &= R_{xy}(\tau, \rho) X_e^0 \end{aligned}$$

Si se realiza una rotación alrededor del eje y (convergencia), seguida de una rotación alrededor del eje x (elevación) quedaría según (8). Al estar la cámara rígidamente unida al ojo se podría plantear (9). Despejando X_w y sustituyendo obtenemos (10)

$$\begin{aligned} X_c^1 &= R_{ec}^1 X_e^1 + T_{ec}^1 & (9) \\ X_c^1 &= R_{wc}^1 X_w^1 + T_{wc}^1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_w &= R_{wc}^{0T} (X_c^0 - T_{wc}^0) & (10) \\ X_c^1 &= R_{wc}^1 R_{wc}^{0T} X_c^0 + T_{wc}^1 - R_{wc}^1 R_{wc}^{0T} T_{wc}^0 \end{aligned}$$

Despejando X_e^0 y sustituyendo se tiene (11) e igualando ambas expresiones se llega a (12).

$$\begin{aligned} X_e^0 &= R_{ec}^{0T} (X_c^0 - T_{ec}^0) & (11) \\ X_c^1 &= R_{ec}^1 R_{xy}(\tau, \rho) R_{ec}^{0T} X_c^0 + (I - R_{ec}^1 R_{xy}(\tau, \rho) R_{ec}^{0T}) T_{ec}^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{wc}^1 R_{wc}^{0T} &= R_{ec}^1 R_{xy}(\tau, \rho) R_{ec}^{0T} & (12) \\ T_{wc}^1 - R_{wc}^1 R_{wc}^{0T} T_{wc}^0 &= (I - R_{wc}^1 R_{wc}^{0T}) T_{ec}^0 \end{aligned}$$

Una vez obtenidas todas las matrices, el sistema puede estar continuamente determinado en el tiempo, de forma que para un instante t , se habrá

rotado un ángulo r_t alrededor del eje y , y otro ángulo t_t alrededor del eje x . Así en 13 quedaría totalmente resuelta la cinemática del ojo.

$$\begin{aligned} X_c(t) &= R_{ec}^0 R_{xy}(\tau_t, \rho_t) R_{ec}^{0T} R_{wc}^0 X_w + R_{ec}^0 R_{xy}(\tau_t, \rho_t) R_{ec}^{0T} T_{wc}^0 & (13) \\ &+ (I - R_{ec}^0 R_{xy}(\tau_t, \rho_t) R_{ec}^{0T}) T_{ec}^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_c(t) &= R_{nc}^0 R_y(\rho) R_{nc}^{0T} R_{wc}^0 X_w + R_{nc}^0 R_y(\rho) R_{nc}^{0T} T_{wc}^0 + & (14) \\ &(I - R_{nc}^0 R_y(\rho) R_{nc}^{0T}) T_{nc}^0 \end{aligned}$$

En (14) se obtiene de manera similar en función de las variaciones del cuello, las coordenadas de la cámara X_c relacionadas con las del mundo X_w . Finalmente el movimiento combinado ojo con cuello se podría expresar según (15).

$$\begin{aligned} X_c(t) &= R_e(t) R_n(t) R_{wc}^0 X_w + & (15) \\ R_e(t) [R_n(t) T_{wc}^0 + (I - R_n(t)) T_{nc}^0] &+ (I - R_e(t)) T_{ec}^0 \end{aligned}$$

Proceso de calibración. El problema de la calibración cinemática se resuelve obteniendo la matriz R y el vector T que cumplan las expresiones anteriores que pueden resumirse en (16), donde se tienen las simplificaciones (17).

$$\begin{aligned} R_c &= R_{wc}^1 R_{wc}^{0T} & (16) \quad R_c R = R R_{e(n)} & (17) \\ R_{e(n)} &= R_{xy}(\tau, \rho) & T_c &= M T \end{aligned}$$

El sistema $R_c R = R R_{e(n)}$ se resuelve empleando alguno de los métodos siguientes:

- Solución por Interpretación Geométrica.
- Solución por Par de Rotación.
- Solución mediante Cuaternios.
- Solución resolviendo $AX=B$ donde las incógnitas X son $(senb_1, cosb_1, \dots, senb_n, cosb_n)$ y n es el número de posiciones distintas de la cámara, teniendo en cuenta la restricción $sen^2 b_i + cos^2 b_i = 1$ a la hora de obtener la solución.
- Solución mediante optimización no lineal.

Un profundo estudio de la resolución de todos estos métodos puede encontrarse en [Gonzalez96].

4.3 Descripción del algoritmo, implementación on-line.

El proceso de captación y procesamiento de las dos imágenes tomadas por el cabezal, pueden esquematizarse en los siguientes pasos: 1. Captura de imagen con el láser encendido. 2. Captura de imagen con el láser apagado. 3. Filtrado y

eliminación de ruido de ambas imágenes. 4. Substracción de ambas imágenes. 5. Binarización de la imagen resultante. 6. Operaciones morfológicas



Figura 3: Ejemplos de proceso de imágenes.

para eliminación de puntos aislados y falsos brillos. 7. Detección de posibles puntos candidatos y sus coordenadas. 8. Análisis de formas y criba de hipótesis falsas. 9. Cálculo de la correspondencia estéreo. 10. Cálculo de la coordenada 3D de las primitivas en función la calibración intrínseca y cinemática. 11. Actualización de la base de datos de las coordenadas espaciales del punto. Los pasos 1 al 8 se realizan en la tarjeta *Datacube mv200* en tiempo real a una velocidad de 25 veces por segundo. Esta tarjeta forma parte del SPC como se explicó anteriormente. Las coordenadas en pixeles de las dos cámaras son pasadas al procesador mp860 que guarda los parámetros de calibración así como la posición del cabezal. Finalmente, si la operación se ha realizado con éxito, la coordenada 3D del punto localizado se pasa del SPC al TIC vía Internet, actualizando la base de datos de obstáculos. En 9, la correspondencia entre dos puntos candidatos, o primitivas, se realiza teniendo en cuenta las restricciones epipolares y la continuidad figural [Jiménez95]. En el paso 10, se emplea la geometría epipolar real del sistema estereoscópico minimizándose el error cuadrático de las falsas intersecciones de las rectas proyectivas que unen el centro focal y las primitivas de las imágenes.

5 Resultados.

Las pruebas realizadas en el laboratorio concluyeron con éxito satisfactorio. Actualmente el sistema se encuentra en fase de prueba en campo, y se están obteniendo resultados muy buenos. En el laboratorio se ha podido medir con precisión el error de localización del cable en los movimiento del cabezal. Ya que los robots estaban fijados en una mesa, y a una distancia constante del cable, la posición espacial del mismo era fácilmente estimable. De esta manera, lo único que podía influir

en la localización del cable era el movimiento de la cabeza. El error comentado ha sido siempre inferior a 1 cm, lo que lo hace mas que suficiente para la aplicación en campo. Teniendo en cuenta que el cable va a estar moviéndose, así como la plataforma donde están sujetos los robots, se creara un cilindro de seguridad de unos 30 mm de diámetro alrededor del cable. El robot no podrá atravesar bajo ninguna circunstancia esta zona de seguridad. En el desarrollo de este proyecto de investigación se han producido varias aportaciones tecnológicas originales. En este apartado cabe destacar un sistema para minimizar el error de medida durante la calibración. Este consiste en la toma de 6 imágenes de un elemento de calibración, modificando únicamente la posición de este. Se realiza entonces la calibración sucesiva de las combinaciones de estas tomadas de dos en dos sin repetición. En la tabla 1 se muestran los resultados de los parámetros intrínsecos, de la calibración para unos valores determinados de zoom, enfoque y apertura.

En esta tabla se puede apreciar que en todos los casos en que la imagen 5 ha sido utilizada, se han obtenido malos resultados, en especial con el centro de la imagen. Es por ello que señalamos esa toma como defectuosa, realizando una nueva calibración con todas las tomas menos la 5. Este método ha sido contrastado con datos simulados, corrompiendo alguna imagen con ruido *gausiano* y aleatorio y calibrando de esta manera. En todos los casos se ha detectado la imagen defectuosa Algunos consejos de cómo eliminar el error de medida puede encontrarse en [Li96].

	f	Cx	Cy	k1	T1	err	Iter
1,2,3,4,5,6	31.0	358.6	337.2	-1.19	1.91	0.22	15
1,2	29.5	351.5	333.2	-1.10	1.81	0.17	17
1,3	30.0	361.9	352.8	-1.02	1.92	0.24	17
1,4	32.1	349.0	315.5	-1.05	1.68	0.21	17
1,5	33.1	357.3	268.9	-1.98	3.27	0.24	52
1,6	28.8	357.7	354.4	-1.19	1.62	0.19	26
2,3	29.0	358.8	362.4	-1.02	1.71	0.22	14
2,4	31.7	344.5	313.8	-1.22	1.64	0.18	11
2,5	30.2	354.2	337.1	-1.38	2.10	0.21	17
2,6	29.4	356.0	350.8	-1.28	1.65	0.16	18
3,4	31.7	370.0	345.9	-0.97	1.60	0.25	15
3,5	28.7	350.1	341.7	-1.18	2.35	0.27	15
3,6	29.3	363.7	355.8	-1.11	1.88	0.23	16
4,5	30.0	362.4	365.0	-1.20	1.08	0.24	15
4,6	31.1	354.7	334.2	-1.18	1.48	0.20	20
5,6	30.2	363.9	351.9	-1.41	1.98	0.23	17
1,2,3,4,6	30.8	357.1	345.4	-1.06	1.71	0.21	18

Tabla 1: Parámetros Intrínsecos de calibración (k1, T1 10⁻⁴)

6 Conclusiones.

El sistema presentado constituye una importante aportación a un problema real, como es el

mantenimiento de las instalaciones en tensión. Suministra al operario una importante información para que proceda a la reparación de líneas aéreas de distribución, sin riesgo de accidente. Las principales dificultades técnicas solucionadas son las inherentes a cualquier sistema de visión tridimensional (falta de precisión, correspondencia, etc.), unidas al agresivo entorno (luz solar) en que debe funcionar el sistema.

Bibliografía.

- [Aenor93] UNE EN 60825, "Seguridad de radiación de productos láser, clasificación de equipos, requisitos y guía del usuario." AENOR 1993.
- [Aracil98] R. ARACIL, F.M. SANCHEZ, D.GARCIA, J.M GONZALEZ, J.M. SEBASTIAN "Obstacle avoidance for Teleoperated Robots for Live Power Lines Maintenance, Using Artificial Vision" IFAC, E.T.S.I. Industriales de Sevilla, ICV98, March 1998
- [Aracil96] R. Aracil, L.F.Peñín, M.Ferre, A.Barrientos, A. Santamaría, P. Martínez, A. Tuduri, F. Val "ROBTET: Robot for Live-Line Maintenance". ICOLIM 1996.
- [Atkinson96] Edited by K.B. ATKINSON "Close Range Photogrammetry and Machine Vision". Whittles Publishing 1996
- [Santamaria97] A. Santamaría, R.Arakil, A.Tuduri, P.Martinez, F.Val, L.F.Peñín, M.Ferre, E.Pinto, A. Barrientos "Teleoperated Robots for Live Power Lines Maintenance". CIRED 1997.
- [Santamaria96] A. Santamaría, P.Mª Martinez Cid, R. Aracil, M. Ferre, L.F. Peñín, L.M. Jiménez, F. Sánchez, E. Pinto y A. Barrientos, A. Tuduri, F. Val "Aplicación de la Robótica al Mantenimiento en Tensión de Instalaciones de Distribución." MATELEC 1996.
- [Aracil95] R. Aracil, L.F. Peñín, M. Ferre, L.M. Jiménez. "Teleoperated System for Live Electrical Power Lines Maintenance." SPIE 1995.
- [Chen91] W. CHEN, B. C. JIANG "3D Camera Calibration Using Vanishing Point Concept". Pattern Recognition. Vol. 24, No 1 pp.57-67, 1991
- [Fan93] H. FAN B. YUAN, "High Performance Camera Calibration Algorithm". SPIE Vol. 2067 Videometrics II (1993) pag 2-13
- [Gonzalez96] J.M. GONZALEZ "Calibración de cabezal estereoscópico con óptica motorizada," Proyecto fin de carrera DISAM 1996.
- [Heikkilä97] J. Heikkilä and O. Silvén. "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction", 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97) San Juan Puerto Rico.
- [Heikkilä96] J. Heikkilä and O. Silvén "Calibration Procedure for Short Focal Length Off-the-shelf CCD cameras" 1996 Proc. 13th International Conference on Pattern Recognition, Vienna", Austria p.166-170
- [Jimenez95] L.M.JIMENEZ, "Modelado de entornos 3D para planificación de Trayectorias de Robots Mediante Visión Estereoscópica y Control Activo de Parámetros Ópticos." Informe técnico DISAM, Junio 1995.
- [Jiménez95] L.M. JIMENEZ. "Enfoque a partir del zoom." Informe técnico DISAM 1995.
- [Li94] M. Li, D Betsis and J.M. Lavest. "Kinematic Calibration of the KTH Head-Eye System" Report from Computational Vision and Active Perception Laboratory (CVAP), Noviembre 1994
- [Li94] M. LI and J.M. LAVEST, "Camera Calibration of a Head-Eye System for Active Vision," Proc. Third European Conf. Computer Vision, J.O. Eklundh, ed., pp. 1:543-554, Stockholm, May 1994.
- [Li96] M. LI, J.M. LAVEST, "Some Aspects of Zoom Lens Camera Calibration". IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 18, NO 11, November 1996.
- [Magee84] M.J. MAGEE, J.K. AGGARWAL. "Determining Vanishing Point from Perspective Images" COMPUTER VISION, GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING 26,256-267 (1984)
- [Sánchez98a] Francisco M. SANCHEZ "Técnicas Fotogramétricas para el Control Dimensional" UPM-DISAM R-98-005v1.0, Premio Fundación ARTIGAS Y SANZ E.T.S.I.I. Marzo 1998
- [Sánchez98b] Francisco M. SANCHEZ "Detector de Colisiones del sistema ROBTET", E.T.S.I. Industriales de Madrid, Jornadas de Automática. Septiembre 1998.
- [Tsai87] R.Y.TSAI, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras as Lenses," IEEE J. Robotics and Automation, vol. 3 no.4, pp.323-331, Aug 1987.
- [Tsai89] R.Y. Tsai,R. K. Lenz "A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/Eye Calibration". IEEE TRANS. ON ROBOTICS AND AUTO. Vol. 5, n°3 June 1989.
- [Wang91] L. WANG, R. TSAI. "Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol. 13.NO4 ,APRIL 1991
- [Wilson94] R.G. WILSON, "Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses," PhD thesis, CMU-IR-TR-94-03, Robotics Inst., Carnegie Mellon Univ, Enero 1994.
- [Xu96] G. XU, Z. ZHANG, "Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition. A Unified Approach" Kluwer Academic Publishers 1996