

Reducción de los Errores, causados por las Vibraciones, en los Sistemas de Medidas de Posición 3D que utilizan Visión y Luz Estructurada.

Luna, C.; Mazo, M.; Lázaro, J. L.; Vázquez, J.; Sarmiento H.

Departamento de Electrónica

Universidad de Alcalá

Madrid, España.

caluna@depeca.uah.es, mazo@depeca.uah.es

Resumen— En los sistemas de medidas de posición 3D que están sometidos a vibraciones, un de los problemas más importantes a resolver es reducir los errores en las medidas que provocan dichas vibraciones de los elementos sensores (cámara y láser). En este trabajo se presenta un nuevo método, basado en cámaras de líneas y marcas artificiales, destinado a reducir estos errores. Además, se hace un estudio de los parámetros geométricos de los elementos sensores que más influyen en los errores de las medidas y se muestran los resultados obtenidos en sistema real.

Palabras claves- posición 3D; vibraciones; luz estructurada; visión.

I. INTRODUCCION

En los sistemas de medidas de posición 3D que basan su funcionamiento en visión y luz estructurada es muy común el uso de tablas, a través de las cuales se obtiene la posición 3D a partir de los valores de la proyección del objeto en el plano imagen. Estas tablas se crean durante el proceso de calibración, por lo que una variación en la geometría del sistema durante el funcionamiento en tiempo real genera errores en las medidas de posición.

La aplicación sobre la que se basa este trabajo, está destinada a medir la posición 3D de los cables de contacto que alimentan a los trenes de tracción eléctrica. En la Fig. 1. se muestra un esquema en bloque del sistema sensor, donde el láser emite un plano de luz infrarroja, cuyo impacto en los cables es captado por la cámara *Cc*, para por triangulación determinar las coordenadas 3D de dicho impacto.

Como coordenadas 3D del cable de contacto, que se identificará por P_w , se consideran las del centroide del área de impacto del láser en dicho cable. Estas coordenadas 3D, están en función de los parámetros de las matrices de rotación y traslación de los diferentes sistemas de

coordenadas respecto al sistema de coordenadas (x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}) . Esto es:

$$P_w(x_w, y_w, z_w) = \text{func}(X_{c0}, Y_{c0}, Z_{c0}, X_{S20}, Y_{S20}, Z_{S20}, X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0}, \alpha_{c0}, \beta_{c0}, \gamma_{c0}, \alpha_{S20}, \beta_{S20}, \gamma_{S20}, \alpha_{L0}, \beta_{L0}, \gamma_{L0}, I_{para}) \quad (1)$$

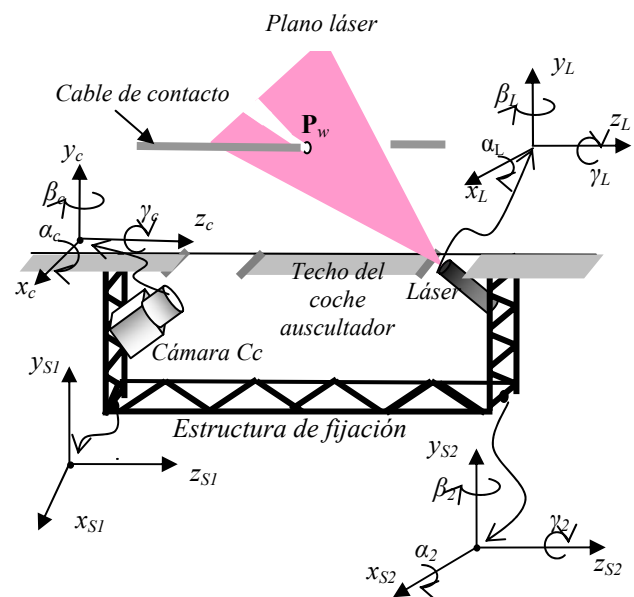


Fig.1. Esquema en bloques y sistema de coordenadas utilizados en las medidas de posición 3D de los cables de contacto.

$X_{c0}, Y_{c0}, Z_{c0}, \alpha_{c0}, \beta_{c0},$ y γ_{c0} son los parámetros que representan los desplazamientos lineales y los ángulos de rotación del sistema de coordenadas asociado a la cámara *c* (x_c, y_c, z_c) respecto al (x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}) ; $X_{S20}, Y_{S20}, Z_{S20}, \alpha_{S20}, \beta_{S20}$ y γ_{S20} son los parámetros de desplazamientos lineales y los ángulos de rotación del sistema de coordenadas (x_{S2}, y_{S2}, z_{S2}) respecto al sistema (x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}) ; $X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0}, \alpha_{L0}, \beta_{L0},$ y γ_{L0} son los parámetros de desplazamientos y los ángulos de rotación de los ejes del sistema de coordenadas (x_L, y_L, z_L)

respecto al sistema (x_{S2}, y_{S2}, z_{S2}) . Todos los parámetros de (1) se obtienen a partir de un proceso de calibración *off-line*, por lo que se suponen conocidos.

Como el sistema debe ir instalado en un coche en movimiento (coche auscultador), las vibraciones producidas por éste son transmitidas al sistema de medida de las coordenadas 3D del cable de contacto, y por tanto los parámetros que aparecen en (1) se ven sometidos a variaciones. Estas variaciones de los parámetros provocan un error en las medidas de las coordenadas de \mathbf{P}_w . Las coordenadas 3D del cable de contacto, considerando el movimiento vibratorio, serán:

$$\mathbf{P}_w(x_w, y_w, z_w) = f(X_{c0} + \Delta X_c, Y_{c0} + \Delta Y_c, \dots, \gamma_{L0} + \Delta \gamma_L) \quad (2)$$

siendo,

$$\mathbf{P}_w = \hat{\mathbf{P}}_w + \varepsilon_{mov} \quad (3)$$

donde, ε_{mov} es el error debido al movimiento, que incluye tanto las variaciones en los desplazamientos lineales como en los giros.

II. ERRORES EN LAS MEDIDAS DEBIDO A LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.

Para analizar el comportamiento de los errores en la medida de posición 3D, debido a la variación de los parámetros geométricos provocada por las vibraciones, se recurre a la simulación del sistema sensor. Para ello se utilizan los sistemas de coordenadas que se muestran en la Fig. 1.

Un punto perteneciente al plano láser, de coordenadas $\mathbf{P}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ con respecto a (x_L, y_L, z_L) , tendrá las coordenadas $\mathbf{P}_{S2i} = [x_{S2i} \ y_{S2i} \ z_{S2i}]^T = \mathbf{R}_{S2L} \cdot \mathbf{T}_{S2L} \cdot \mathbf{P}_i$ respecto al sistema de coordenada (x_{S2}, y_{S2}, z_{S2}) . Donde $\mathbf{R}_{S2L} \cdot \mathbf{T}_{S2L}$ es la matriz rotación-traslación del plano láser respecto al sistema de coordenadas (x_{S2}, y_{S2}, z_{S2}) .

De igual forma, se obtienen las coordenadas $\mathbf{P}_{S1i} = [x_{S1i} \ y_{S1i} \ z_{S1i}]^T = \mathbf{R}_{S1S2} \cdot \mathbf{T}_{S1S2} \cdot \mathbf{P}_{S2i}$ respecto al sistema (x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}) y las coordenadas $\mathbf{P}_{ci} = [x_{ci} \ y_{ci} \ z_{ci}]^T = \mathbf{R}_{S1c} \cdot \mathbf{T}_{S1c} \cdot \mathbf{P}_{S1i}$ respecto al sistema (x_c, y_c, z_c) , donde $\mathbf{R}_{S1S2} \cdot \mathbf{T}_{S1S2}$ es la matriz rotación-traslación entre los sistemas de coordenadas (x_{S2}, y_{S2}, z_{S2}) y (x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}) , y $\mathbf{R}_{S1c} \cdot \mathbf{T}_{S1c}$ es la matriz rotación-traslación del sistema de coordenadas (x_c, y_c, z_c) respecto al sistema de coordenadas (x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}) .

Para obtener las proyecciones de \mathbf{P}_{ci} sobre el plano imagen de la cámara, se aplica la transformación de perspectiva:

$$u_{ci} = \frac{f \cdot x_{ci}}{z_{ci}} \quad (4)$$

$$v_{ci} = \frac{f \cdot y_{ci}}{z_{ci}} \quad (5)$$

donde, u_{ci} y v_{ci} son la proyección del punto \mathbf{P}_i en el plano imagen de la cámara.

Con la ecuación del plano láser después de ser calibrado y la proyección en el plano imagen de los puntos donde el láser impacta en los cables de contacto se pueden calcular las coordenadas 3D de estos puntos de impacto en el espacio 3D.

Para simular los errores en las medidas de descentramiento, altura y profundidad de los cables de contacto se utilizan los parámetros geométricos estáticos: $Z_{S20} = 2.8 \text{ m}$, $\alpha_{a0} = 34.5$ grados, $\alpha_{L0} = 20.5$ grados y los restantes parámetros se consideran igual a cero. El sensor utilizado es de 1280×1024 píxeles y la distancia focal de la lente es de 22 mm . Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. A partir de los valores de los ángulos de rotación $\alpha_{L0} = 20.5$ grados, $\beta_{L0} = 0$ y $\gamma_{L0} = 0$ y sin desplazamientos ($X_{L0} = 0$, $Y_{L0} = 0$ y $Z_{L0} = 0$), se determina la ecuación del plano láser en estático,

$$A_{est}X + B_{est}Y + C_{est}Z + D_{est} = 0 \quad (6)$$

2. Se determinan los puntos \mathbf{P}_{S1i_est} donde los cables de contacto se cortan con el plano láser en estático respecto al sistema de coordenadas (x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}) . Para ello se supone que los cables se encuentran paralelos al eje de coordenadas z_{S1} ,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{S1i_est} &= (x_{S1i_est}, y_{S1i_est}, z_{S1i_est}), \\ z_{S1i_est} &= \frac{D_{est} - A_{est} \cdot x_{S1i_est} - B_{est} \cdot y_{S1i_est}}{C_{est}} \end{aligned} \quad (7)$$

3. Se le adiciona un incremento a los parámetros X_{c0} , Y_{c0} , Z_{c0} , α_{c0} , β_{c0} , γ_{c0} , X_{L0} , Y_{L0} , Z_{L0} , α_{L0} , β_{L0} , y γ_{L0} de las matrices de rotación-traslación y se calcula la nueva posición de la cámara o del láser. Para el caso en que se modifican los parámetros geométricos del plano láser, se calcula la nueva ecuación de éste y los nuevos puntos de intersección de los cables de contacto,

$$A_{mov}X + B_{mov}Y + C_{mov}Z + D_{mov} = 0 \quad (8)$$

entonces,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{S1i_mov} &= (x_{S1i}, y_{S1i}, z_{S1i_mov}), \\ z_{S1i_mov} &= \frac{D_{mov} - A_{mov} \cdot x_{S1i} - B_{mov} \cdot y_{S1i}}{C_{mov}} \end{aligned} \quad (9)$$

4. Se calculan los valores de \mathbf{P}_{ci} después del movimiento (\mathbf{P}_{ci_mov}). Cuando el movimiento es del láser,

$$\mathbf{P}_{ci_mov} = \mathbf{R}_{S1c} \cdot \mathbf{T}_{S1c} \cdot \mathbf{P}_{S1i_mov} \quad (10)$$

y cuando el movimiento es de la cámara,

$$\mathbf{P}_{ci_mov} = \mathbf{R}_{S1c_mov} \cdot \mathbf{T}_{S1c_mov} \cdot \mathbf{P}_{S1i_est} \quad (11)$$

siendo, $\mathbf{R}_{S1c_mov} \cdot \mathbf{T}_{S1c_mov}$ las matrices de rotación y traslación después de adicionarle el incremento a sus parámetros.

- Se calculan los valores de u_{ci} y v_{ci} después del movimiento:

$$u_{ci_mov} = \frac{f \cdot x_{ci_mov}}{z_{ci_mov}} \quad (12)$$

$$v_{ci_mov} = \frac{f \cdot y_{ci_mov}}{z_{ci_mov}} \quad (13)$$

- Con la ecuación del plano láser en estático, los valores u_{ci_mov} y v_{ci_mov} y las matrices de rotación y traslación antes de adicionarle movimiento $\mathbf{R}_{S1c} \cdot \mathbf{T}_{S1c}$, se calcula la posición de los cables de contacto:

$$\hat{\mathbf{P}}_{S1i_est} = (\mathbf{R}_{S1c} \cdot \mathbf{T}_{S1c})^{-1} \cdot \hat{\mathbf{P}}_{ci} \quad (14)$$

donde, $\hat{\mathbf{P}}_{ci} = [\hat{x}_{ci} \quad \hat{y}_{ci} \quad \hat{z}_{ci}]^T$

siendo,

$$\hat{x}_{ci} = \frac{D_{est} \cdot u_{ci_mov}}{A_{est} \cdot u_{ci_mov} + B_{est} \cdot v_{ci_mov} + C_{est} \cdot f} \quad (15)$$

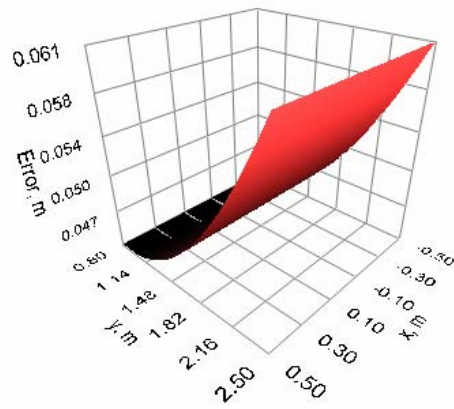
$$\hat{y}_{ci} = \frac{D_{est} \cdot v_{ci_mov}}{A_{est} \cdot u_{ci_mov} + B_{est} \cdot v_{ci_mov} + C_{est} \cdot f} \quad (16)$$

$$\hat{z}_{ci} = \frac{D_{est} \cdot f}{A_{est} \cdot u_{ci_mov} + B_{est} \cdot v_{ci_mov} + C_{est} \cdot f} \quad (17)$$

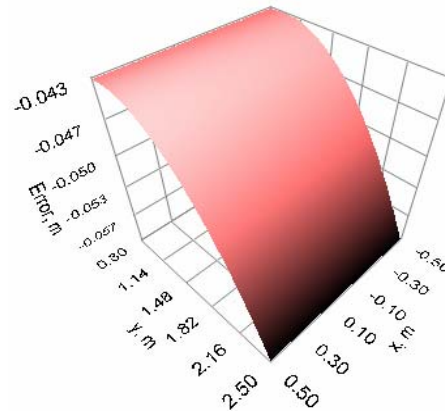
El error en las medidas, debido al movimiento de la cámara o del láser, se puede determinar por:

$$\mathcal{E}_{mov} = \mathbf{P}_{S1i_est} - \hat{\mathbf{P}}_{S1i_est} \quad (18)$$

Los resultados obtenidos mediante simulaciones demuestran que los errores en las medidas son mayores para los ángulos de la cámara α_c y β_c y para el ángulo de inclinación frontal del láser α_L . En la Fig. 2 se muestra el error en la medida de altura en toda la zona a medir, para incrementos de $\alpha_c = \pm 1$ grado. En lo que sigue, las coordenadas y representan el alto y las coordenadas x el ancho de la zona a medir (zona donde se pueden encontrar los cables de contacto respecto al sistema de referencia principal).



$\alpha_c = -1$ grado



$\alpha_c = +1$ grado

Fig.2. Error en la medida de altura del cable, para incrementos de $\alpha_c = \pm 1$ grado.

En la Fig. 2 se puede observar, que para incrementos positivos y negativos el error en la medida de altura es mayor a medidas que la altura del cable sea mayor. Para $\alpha_c = +1$ grado el error máximo es de 6.1 cm, mientras que para $\alpha_c = -1$ grado el error máximo es de -5.9 cm. En ambos casos el error en la medida de descentramiento lateral del cable es inferior a ± 0.6 cm.

Cuando las variaciones son del ángulo β_c , el error máximo en la medida de altura del cable es inferior a ± 0.3 cm, mientras en la medida de descentramiento lateral del cable el error es de ± 5.4 cm para $\beta_c = \pm 1$ grado, ver Fig 3.

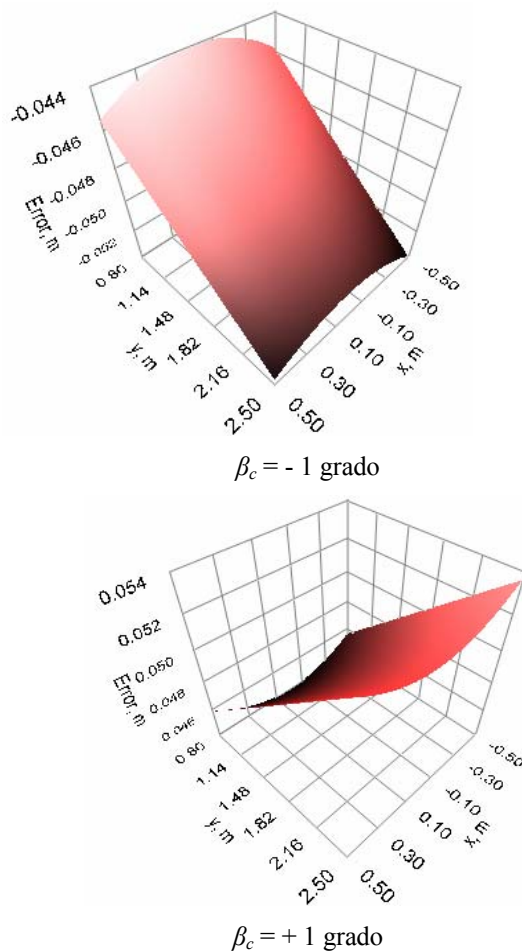


Fig.3. Error en la medida de descentramiento lateral del cable, para incrementos de $\beta_c = \pm 1$ grado

Para el caso en que el movimiento es del láser el parámetro que mayor influencia tiene es α_L , en la medida de la altura del cable. El error máximo en dicha medida para variaciones de $\alpha_L = + 1$ grado es de 3.9 cm , y de 4.5 cm para variaciones de $\alpha_L = - 1$ grado.

En simulaciones realizadas variando de forma aleatoria todos los parámetros geométricos de la cámara y del láser, para una secuencia de 1000 imágenes, los errores en la medida de altura del cable alcanzaron valores entre $- 10.48\text{ cm}$ y 10.86 cm y los errores en la medida de descentramiento lateral del cable entre -7.36 cm y 8.88 cm .

Como en nuestra aplicación se requiere que los errores en las medidas de altura y descentramiento del cable de contacto sean inferiores a 1 cm , es necesario utilizar algún método que permita reducir estos errores hasta los niveles permisibles.

III. REDUCCIÓN DE LOS ERRORES

Los métodos utilizados para la estabilización de imágenes más usados basan su funcionamiento en flujo óptico, por lo que no pueden ser utilizados en esta aplicación, debido a que el coche auscultador puede desplazarse a velocidades de

hasta 200 km/h , cambiando todo el contenido entre imágenes consecutivas. Además, estos métodos buscan la estabilidad de una secuencia de imágenes y no posición real de los objeto en cada escena captada.

En esta aplicación se añade a la cámara un filtro interferencial para atenuar los ruidos que provienen de otras fuentes luminosas, por lo que en la imagen captada sólo se ven los impactos de la emisión láser en los cables de contacto y en otros objetos reflectores. Esto hace que sea imposible corregir el efecto de las vibraciones a partir de la información de la imagen captada.

En [1] y [2] se describe un método desarrollado con el objetivo de medir los ángulos de rotación y los desplazamientos de la cámara y del láser, utilizando dos cámaras de área y dos marcas artificiales. Este método presenta el inconveniente, de que no se pueden medir componentes espectrales de altas frecuencias, debido a la velocidad de trabajo de las cámaras de área y al tiempo de procesamiento que conlleva la selección de los centroides de los puntos de interés de la marcas.

En este trabajo se expone un nuevo método (basado en [1]), en el cual se sustituyen las cámaras de áreas por cámaras de líneas y se utiliza otro tipo de marcas artificiales, con las cuales se pueden seleccionar de forma sencilla los puntos de interés en la línea captada. En este caso, se fijan a la cámara C_c , de forma solidaria, una cámara de línea (Ca) y una marca artificial (Ma), formando un subsistema compacto que denominaremos $S1$. Al láser se unirá la otra cámara de línea (Cb) y la otra marca (Mb), formando el subsistema $S2$. En la Fig. 4 se muestra la marca Ma y se representa la línea capturada por la cámara Ca .

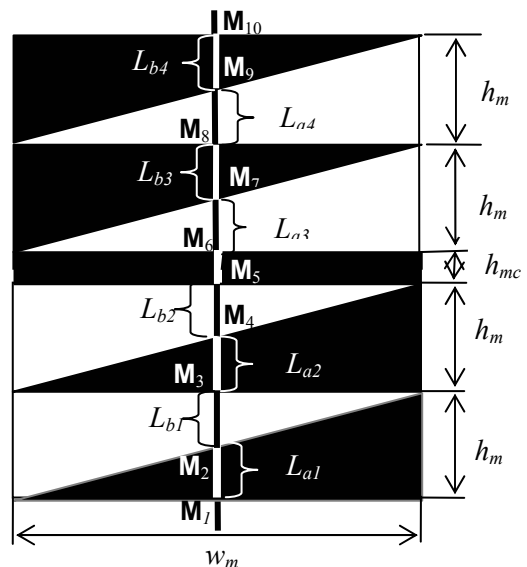


Fig.4. Vista frontal de Ma y línea captada por Ca .

Dado que los sistemas de medidas de los ángulos de rotación de los subsistemas $S1$ y $S2$ son similares, en este trabajo sólo se analizará el procedimiento desarrollado para obtener las variaciones de los ángulos de $S1$, debido a las

vibraciones. Un estudio similar se puede realizar para determinar la influencia de las vibraciones sobre el subsistema $S2$.

Para determinar la influencia de las vibraciones en $S1$ se siguen los tres pasos siguientes:

1. A partir de la línea imagen captada con la cámara Ca y la geometría de la marca Ma , se obtienen las coordenadas (x_i, y_i, z_i) de los puntos donde hay cambio de color blanco-negro (\mathbf{M}_i) en la marca Ma .

2. Con las coordenadas de los diferentes puntos \mathbf{M}_i y sus correspondientes valores en la línea imagen de Ca , se calculan los ángulos de rotación de Ca (los ángulos medidos los identificaremos por $\hat{\alpha}_a, \hat{\beta}_a, \hat{\gamma}_a$).

3. Las variaciones en los ángulos de rotación de la cámara ca ($\Delta\hat{\alpha}_a, \Delta\hat{\beta}_a, \Delta\hat{\gamma}_a$), se obtienen a partir de la diferencia entre los ángulos obtenidos en el punto 2 y los obtenidos en ausencia de vibraciones ($\alpha_{a0}, \beta_{a0}, \gamma_{a0}$).

Con el objetivo de aprovechar al máximo el campo visual de la cámara Ca , se debe introducir una cierta inclinación entre los planos de la marca Ma y la línea imagen de la cámara Ca . Pese a ello, para calcular los puntos \mathbf{M}_i se va a hacer la consideración de que la relación entre los segmentos L_{bj} and L_{aj} sobre la marca Ma son aproximadamente igual a la relación de sus proyecciones en la línea captada por la cámara Ca :

$$\frac{L_{bj}}{L_{aj}} \approx \frac{\Delta v_{abj}}{\Delta v_{aaj}} \quad (19)$$

donde, $j = 1, 2, 3, 4$ y Δv_{abj} y Δv_{aaj} son las proyecciones en la línea imagen de los segmentos L_{bj} y L_{aj} , correspondientes a los segmentos de líneas blancas y negras, respectivamente.

Se demuestra, mediante simulaciones, que aunque (19) no se cumpla exactamente, su efecto en la obtención de los ángulos de vibración del subsistema $S1$ no es significativo. En lo que sigue la coordenada vertical sobre la línea imagen de la cámara Ca se identifica por v_a y la proyección del punto de cambio de color \mathbf{M}_i capturado por Ca se identifica por $v_{ai\text{ meas}}$.

Para cada uno de los valores de v_{ai} correspondientes a los cambios de color blanco-negro sobre la marca Ma ($\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_{10}$), se calculan sus coordenadas \mathbf{M}_i . Estas coordenadas vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\text{Para } j = \frac{i}{2} \text{ e } i = 2, 4:$$

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \frac{w_m}{\frac{L_{bj}}{L_{aj}} + 1}, & h_m \cdot (j-1) + \frac{h_m}{\frac{L_{bj}}{L_{aj}} + 1}, & 0 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

para $i = 1, 3, 5$:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} x_2 + \frac{x_4 - x_2}{y_4 - y_2} (y_i - y_2), & h_m \cdot \frac{(i-1)}{2}, & 0 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

para $j = \frac{i-1}{2}$ e $i = 7, 9$:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \frac{w_m}{\frac{L_{bj}}{L_{aj}} + 1}, & h_{mc} + h_m \cdot \left(\frac{i-3}{2}\right) + \frac{h_m}{\frac{L_{bj}}{L_{aj}} + 1}, & 0 \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

para $i = 6, 8, 10$:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} x_7 + \frac{x_9 - x_7}{y_9 - y_7} (y_i - y_7), & h_m \cdot \left(\frac{i}{2} - 1\right) + h_{mc}, & 0 \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

Una vez obtenidas las coordenadas de \mathbf{M}_i , se obtienen los ángulos de rotación de la cámara Ca , debidos a las vibraciones. Para ello se utiliza un procedimiento similar al usado en [1], teniendo en cuenta que cómo Ca es una cámara de línea $u_{ai\text{ meas}} = 0$.

IV. RESULTADOS

Con el objetivo de validar el método propuesto se realiza un montaje a nivel de laboratorio, en el cual se fijan en un mismo soporte una cámara de área (A5001 de *Basler*), enfocada a un pantalla blanca con diferentes figuras geométricas negras y una cámara de línea (Aviva M2 2010 de *Atmel*) enfocada a una marca igual a la mostrada en la Fig. 4, situada a una distancia de 2.82 m.

Las características de los dispositivos utilizados son las siguientes:

- Cámara Cc (A5001: distancia focal $f = 0.10$ m, sensor de 1024 x 1280 píxeles, dimensión de los píxeles $12 \times 10^{-6} \times 12 \times 10^{-6}$ m y velocidad de captura de 120 imágenes por segundo.
- Cámara Ca (Aviva M2 2010): distancia focal $f = 0.21$ m, sensor de 2048 píxeles, dimensión de los píxeles $12 \times 10^{-6} \times 12 \times 10^{-6}$ m y velocidad de captura de 120 líneas por segundo
- Dimensiones de la marca Ma : $w_m = 0.20$ m, $h_m = 0.05$ m, $h_{mc} = 0.01$ m.

El experimento se realiza siguiendo los pasos siguientes:

1. Se captura una secuencia de 1000 imágenes y 1000 líneas de forma sincrónica, con el soporte con las cámaras en estático y con la secuencia de líneas se calculan los ángulos de rotación de C_a (α_{a0} , β_{a0} y γ_{a0}).
2. Se hace vibrar el soporte con las cámaras, se captura otra secuencia de 1000 imágenes y 1000 líneas de forma sincrónica, se calculan los ángulos rotación de C_a en movimiento ($\hat{\alpha}_a$, $\hat{\beta}_a$, $\hat{\gamma}_a$) y se le restan los valores obtenidos en estático (α_{a0} , β_{a0} y γ_{a0}), esto es: $\Delta\hat{\alpha}_a = \alpha_{a0} - \hat{\alpha}_a$, $\Delta\hat{\beta}_a = \beta_{a0} - \hat{\beta}_a$ y $\Delta\hat{\gamma}_a = \gamma_{a0} - \hat{\gamma}_a$
3. Los valores $\Delta\hat{\alpha}_a$, $\Delta\hat{\beta}_a$, $\Delta\hat{\gamma}_a$, se toman como coeficientes de \mathbf{R}_{S1c} y se rota la imagen adquirida por C_c .

En la Fig. 5 a) se muestra el valor medio de un segmento de 100 imágenes sin modificar, donde se pueden apreciar diferentes posiciones de los objetos en una extensión amplia de la imagen. En la Fig. 5 b) se muestra el valor medio de la secuencia, después de haber llevado el contenido de cada imagen a la posición de reposo, mediante la rotación. Hay que señalar como inconveniente que existe un pequeño error en las medidas de posición (x , y) de los objetos (sólo se analizó para el círculo negro que aparece en la parte central de la imagen, cuyo diámetro es de 7 mm). Esto se debe al error de cuantificación cuando se seleccionan los puntos de cambios de color blanco-negro en la línea capturada.

Se pudo comprobar con el experimento realizado que el error cometido en la mediada de posición (x , y) nunca fue superior a los 0.4 cm. Este pequeño error puede ser reducido aplicando técnicas de filtrado a los valores de $\Delta\hat{\alpha}_a$, $\Delta\hat{\beta}_a$, $\Delta\hat{\gamma}_a$ y/o aumentando la resolución espacial de la cámara de línea.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un método para medir los valores instantáneos de los ángulos de rotación de los componentes (cámara C_c y láser) que conforman el sistema sensor de posición 3D y con ello determinar las variaciones de estos ángulos, generadas como consecuencia de las vibraciones a las que se ven sometidos dichos componentes por encontrarse instalados en un vehículo en movimiento. Este método, basado en dos cámaras de línea y dos marcas artificiales, permite medir con una alta precisión las variaciones de ángulos, y en consecuencia se pueden reducir

de forma significativa, los efectos que las vibraciones provocan en el sistema de medida de las coordenadas 3D.

El sistema propuesto presenta numerosas ventajas, entre las que se pueden destacar el que permite realizar la estimación de las vibraciones, con independencia de la velocidad de desplazamiento del coche auscultador; permite medir componentes frecuenciales de las vibraciones de muy alta frecuencia, ya que las cámaras de línea alcanzan altas velocidades de muestreo y el tiempo de procesamiento es reducido. El único inconveniente que se puede resaltar de la solución propuesta es la necesidad de tener que utilizar dos cámaras de línea adicionales.

Los resultados que se han obtenido en las simulaciones y experimentos realizados ponen de manifiesto la validez y efectividad del método propuesto.

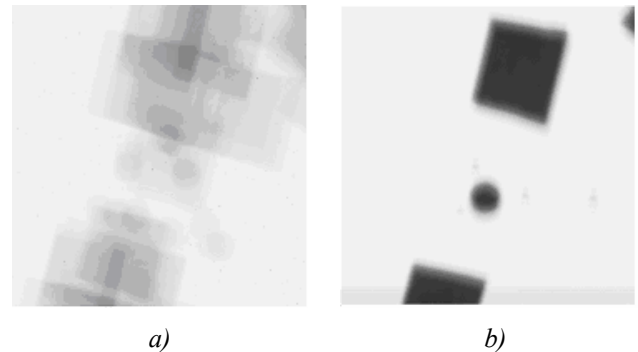


Fig.5. Valor medio de una secuencia de 100 imágenes. a) Originales; b) Corregidas con el método propuesto en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias a la Empresa de Logística y Telecomunicaciones (LogyTel S.L.), la Red Nacional de Ferrocarriles de España (RENFE) y a la Cátedra de Control Electrónico Aplicado al Transporte de la Universidad de Alcalá.

REFERENCIAS

- [1] Luna, C. A.; Mazo, M.; Lázaro, J. L.; Palazuelos, S. E.; Vázquez, J. F.; Hierrezuelo, L.; Santiso, E.; García, J. J.; Jiménez, J. A. "Attenuation of the vibration effects in a 3D coordinates measurement system installed in a railway car". IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV'04. Parma. Italy. Jun. 2004.
- [2] Luna, C. A.; Mazo, M.; Lázaro, J. L.; Vázquez, J. F. "Medida de los Ángulos de Rotación y Desplazamientos Lineales, Producidos por el Movimiento Vibratorio, Utilizando Cámaras y Marcas Artificiales. Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial (SAAEI'04). Toulouse, Francia, Septiembre 2004.