

AUTOCALIBRACIÓN DE PARÁMETROS EXTRÍNSECOS DE SISTEMAS ESTÉREO PARA APLICACIONES DE TRÁFICO

B.Musleh, J.Beltrán, C.Jaraquemada, M.J.Gómez-Silva, N. Hernández y J.M. Armingol

Laboratorio de Sistemas Inteligentes

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid

{bmusleh,magomezs,nohernan,armingol}@ing.uc3m.es {jorge.beltran, carlosborja.jaraquemada}@uc3m.es

Resumen

En este artículo se presenta un método de autocalibración de los parámetros extrínsecos de un sistema estéreo en aplicaciones de tráfico. Dicho método se basa en determinar la geometría de la calzada delante del vehículo. Esta posición relativa varía considerablemente mientras el vehículo circula, por tanto, resulta de gran interés poder estimarla para su aplicación en múltiples aplicaciones basadas en visión por computador, tales como: sistemas avanzados de ayuda a la conducción, vehículos autónomos o robots. Estos continuos cambios en la posición del sistema estéreo se traducen en variaciones en los valores de los parámetros extrínsecos (altura, ángulo de cabeceo y ángulo de alabeo). La validación del método de autocalibración es realizada mediante el empleo de un algoritmo de odometría visual, donde se evalúa la mejora en los resultados que supone conocer en todo momento el valor de los parámetros extrínsecos del sistema estéreo.

Palabras clave: autocalibración parámetros extrínsecos, visión estéreo, odometría visual

1. INTRODUCCIÓN

Los actuales sistemas de ayuda a la conducción o ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) y los vehículos autónomos requieren de aplicaciones con un alto grado de complejidad para obtener resultados precisos. Estas aplicaciones emplean sensores tales como: láseres lidar y sistemas de visión (monoculares o estéreo) entre otros. Los algoritmos de los ADAS relacionan los datos proporcionados por los sensores con los elementos existentes en el entorno del vehículo. En particular, los sistemas basados en visión tienen la dificultad de establecer la correspondencia entre la localización de los objetos en el mundo y su proyección sobre el plano de imagen. Esta correspondencia viene determinada por los parámetros intrínsecos y extrínsecos del sistema de visión. Los parámetros intrínsecos son aquellos que relacionan el conjunto cámara-óptica y pueden ser determinados por medio de un proceso de calibración. Por otro lado, los

parámetros extrínsecos expresan la situación de la cámara respecto de la calzada: posición (altura (h)) y orientación (guiñada (ϕ), cabeceo (θ) y alabeo (ρ)). El valor de dichos parámetros extrínsecos varía considerablemente mientras el vehículo circula.

Existen principalmente tres técnicas diferentes para estimar la posición relativa de un sistema estéreo en aplicaciones de tráfico. La primera corresponde al empleo de un patrón de calibración para determinar los parámetros extrínsecos, pudiéndose situar dicho patrón sobre el suelo delante del vehículo [14] o pintado sobre el capó del vehículo [1]. Existe también la opción de hacer uso de las marcas viales de la calzada [6][12], como pueden ser las líneas de la carretera [2]. Esta segunda técnica facilita el proceso de calibración y permite poder recalcular el valor de los parámetros extrínsecos en diferentes instantes y lugares. El problema surge principalmente en los entornos urbanos de tráfico, ya que las marcas viales pueden estar en malas condiciones de conservación u ocluidas por elementos, como por ejemplo, vehículos estacionados. Por último, puede hacerse uso de la geometría de la calzada delante del vehículo para estimar los parámetros extrínsecos [10] [19], evitando tener que hacer uso de ningún tipo de patrón de calibración o información procedente de las marcas viales.

En este artículo se presenta un método de autocalibración para la estimación de los parámetros extrínsecos de un sistema estéreo basado en la determinación de la geometría de la calzada delante del vehículo. Para ello, se emplea el mapa de disparidad [18] y el *uv-disparity* [11] [7] con objeto de determinar qué píxeles de la imagen pertenecen a la calzada (mapa libre) y cuáles pertenecen a obstáculos (mapa de obstáculos) [15]. Una vez que la calzada ha sido detectada, el objetivo del método de autocalibración es actualizar los cambios en la posición relativa entre el sistema estéreo y la calzada. La implementación de este método permite disponer de medidas de distintos parámetros extrínsecos (altura (h), ángulo de cabeceo (θ) y ángulo de alabeo (ρ)) para cada imagen capturada (Fig.1a). Sin embargo, la desviación en el ángulo

de guiñada (ϕ) se supone constante en el tiempo. La autocalibración de los parámetros extrínsecos ha sido empleada como entrada a un algoritmo de odometría visual [17][4]. El método de odometría visual empleado corresponde al presentado en [16], el cual ha sido evaluado con varias trayectorias de un base de datos pública que dispone de información sobre el *grond truth* [5]. Los resultados del algoritmo de odometría visual muestran el efecto de la autocalibración de los parámetros extrínsecos sobre la estimación del movimiento del vehículo.

La estructura del artículo es la siguiente. En la sección 2 se describe el método de autocalibración, el cual se ha dividido en la calibración de la desviación de la guiñada (ϕ) por un lado, y la autocalibración de los parámetros extrínsecos restantes (altura (h), ángulo de cabeceo (θ) y ángulo de alabeo (ρ)) por otro. La aplicación de la autocalibración al algoritmo de odometría visual se detalla en la sección 3, cuyos resultados son mostrados en la siguiente sección (4). Finalmente, las conclusiones se enumeran en la sección 5.

2. MÉTODO DE AUTOCALIBRACIÓN

El algoritmo de autocalibración que se presenta está dividido en dos etapas. En la primera, se calcula la desviación de la guiñada (ϕ) entre el sistema estéreo y la dirección del movimiento del vehículo mientras éste realiza un desplazamiento en línea recta. Se asume que la desviación de la guiñada (ϕ) es constante en el tiempo, y por tanto, que su valor no varía mientras el vehículo circula. La segunda etapa consiste en obtener la altura (h), el cabeceo (θ) y el alabeo (ρ) entre el sistema estéreo y la calzada. Esta segunda fase se lleva a cabo para cada nueva imagen, con el objetivo de detectar cambios en los valores de los parámetros extrínsecos (h, θ, ρ) entre la calzada y el sistema estéreo.

2.1. Calibración de la guiñada

La calibración de la guiñada se basa en la detección del punto de fuga a lo largo de dos imágenes consecutivas mientras el vehículo mantiene un movimiento rectilíneo. Idealmente, cuando no hay desviación de la guiñada, la coordenada horizontal del punto de fuga (u_{vp}) debe ser igual a la coordenada horizontal del centro óptico (u_0). Mientras que, si existe desviación de la guiñada (ϕ), ésta puede ser calculada utilizando (1), donde α es la distancia focal. El método implementado realiza un emparejamiento de puntos característicos [13] entre dos imágenes consecutivas para determinar el punto de fuga, de tal forma que siendo las coordenadas del enésimo punto característico

en la imagen izquierda (u_{n_1}, v_{n_1}) y (u_{n_2}, v_{n_2}) en la siguiente imagen, se puede construir una línea recta r_n (2) para cada punto característico. Siendo el punto de fuga el correspondiente a la intersección de cada una de las rectas con el resto.

$$\phi = \arctan\left(\frac{u_{vp} - u_0}{\alpha}\right) \quad (1)$$

$$v = \frac{v_{n_2} - v_{n_1}}{u_{n_2} - u_{n_1}} \cdot u + v_{n_2}(u_{n_2} + u_{n_1}) \quad (2)$$

El proceso de calibración se lleva a cabo en un entorno no controlado, donde pueden aparecer elementos dinámicos que complican el cálculo del punto de fuga. Para reducir esta problemática, se utilizan únicamente los puntos característicos correspondientes a la calzada en el cómputo del punto de fuga. Sin embargo, existen también otras fuentes de error, como la vibración del vehículo y el emparejamiento incorrecto de puntos. Un método muy útil para solucionar este tipo de errores (datos atípicos) es Random Sample Consensus (RANSAC) [3]. El punto de fuga resultante para cada par de imágenes consecutivas es seleccionado mediante RANSAC de entre todos los puntos de intersección de las diferentes líneas (r_n). Este proceso es repetido durante una serie de imágenes, y la solución final de entre todas las soluciones parciales de punto de fuga es determinada nuevamente mediante RANSAC. Un ejemplo de procesamiento de dos imágenes consecutivas se muestra en la Fig. 1c, donde la posición de los diferentes puntos característicos en las dos imágenes consecutivas está unido mediante líneas verdes y las correspondientes intersecciones de estas líneas (puntos en rojo) determinan el punto de fuga.

2.2. Calibración de Altura, Cabeceo y Alabeo

Una vez estimada la desviación de la guiñada (Fig.1b), la configuración del sistema estéreo y la calzada se describe en la Fig. 1a. El sistema estéreo está compuesto por dos cámaras cuyos planos de imagen son coplanares para hacer posible que las líneas epipolares puedan ser paralelas. Siguiendo la nomenclatura y explicación presentada por Labayrade et al. en [10], es posible relacionar las coordenadas homogéneas en el mundo de un punto $P = (X, Y, Z, 1)$ con su proyección en ambos planos de imagen del sistema estereo ($u_i \cdot S, v \cdot S, S, 1$) mediante (3) y (4).

$$\begin{bmatrix} u_i S \\ v S \\ S \\ 1 \end{bmatrix} = M_{proj} \cdot M_{Tx} \cdot M_{Rx} \cdot M_{Rz} \cdot M_{Ty} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

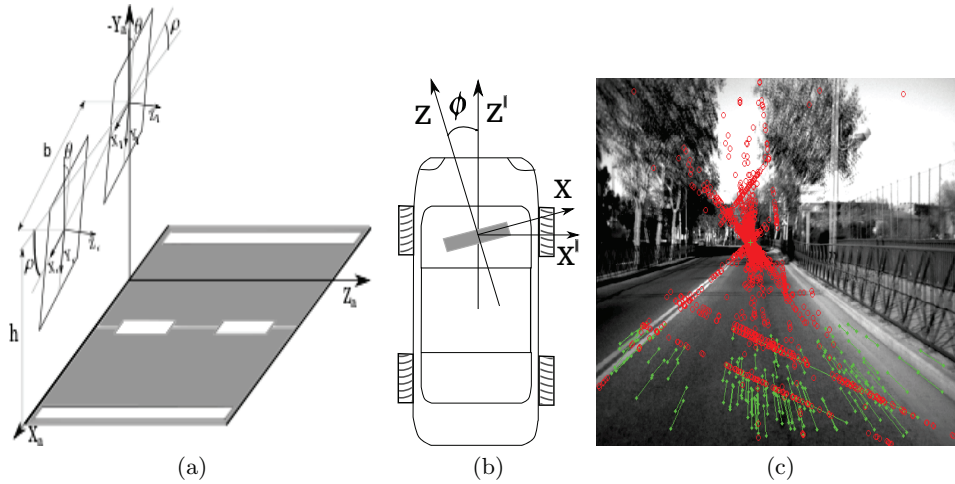


Figura 1: (a) Esquema de la configuración del sistema estéreo respecto de la calzada. (b) Esquema descriptivo de la desviación de la guiñada. (c) Ejemplo del resultado de calibración de la desviación de la guiñada en un entorno urbano; Superposición de dos imágenes consecutivas izquierdas donde las posiciones de los puntos característicos están unidas mediante líneas verdes, mientras que sus intersecciones se muestran mediante puntos en rojo.

$$\begin{aligned}
 M_{proj}(\alpha, u_0, v_0) &= \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 M_{Tx}(\varepsilon_i b) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\varepsilon_i b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 M_{Rx}(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) \\
 M_{Rz}(\rho) &= \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho & 0 & 0 \\ \sin \rho & \cos \rho & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 M_{Ty}(h) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & h \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Donde $i = r$ para la cámara derecha y $i = l$ para la izquierda, siendo $\varepsilon_r = 1$ y $\varepsilon_l = 0$ respectivamente. b es la distancia entre ambas cámaras (*baseline*), (u_0, v_0) son las coordenadas del centro óptico y α es la distancia focal en píxeles. El sistema estéreo está rotado un ángulo θ (cabeceo) alrededor del eje X y un ángulo ρ (alabeo) alrededor del eje Z , que corresponden a los ángulos respecto del sistema estéreo y la calzada (Fig. 1a). Finalmente, las cámaras se encuentran elevadas una altura h respecto de la calzada.

La profundidad (Z) de cualquier punto del mundo es función de la disparidad (Δ), que es la di-

ferencia entre las coordenadas horizontales de la proyección del punto en ambas imágenes. La expresión de $u_r \cdot S$ para la cámara derecha y de $u_l \cdot S$ para la izquierda, se pueden obtener empleando la ec. (3). Por tanto, la expresión final de la disparidad (Δ) para cada punto $P = (X, Y, Z, 1)$ es (5).

$$\begin{aligned}
 \Delta &= \frac{u_l S - u_r S}{S} \\
 \Delta &= \frac{\alpha \cdot b}{Z \cos \theta + (Y + h) \cos \rho \sin \theta + X \sin \rho \sin \theta} \quad (5)
 \end{aligned}$$

A continuación, estamos en disposición de obtener la relación entre las coordenadas de la imagen de los puntos que pertenecen a la calzada. El suelo o calzada delante del sistema estéreo corresponde a todo punto que cumpla que $Y = 0$, como se muestra en la Fig. 1a. Por tanto, es necesario obtener la expresión de Y como función de las coordenadas de la imagen $\{u, v\}$, los parámetros extrínsecos e intrínsecos del sistema estéreo $\{\alpha, b, u_0, v_0, h, \rho, \theta\}$, y la disparidad (Δ). La relación entre las coordenadas del mundo y las de la imagen izquierda ($\varepsilon_l = 0$) (3) puede ser formulada de manera inversa (6), para obtener la expresión para cada uno de los puntos pertenecientes a la calzada (7). El valor de S es una función de las coordenadas del mundo (X, Y, Z) , ese es el principal problema de este procedimiento, y se puede resolver expresando S como $S = \alpha b / \Delta$ usando la expresión para la disparidad (5).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = M_{Ty}^{-1} \cdot M_{Rz}^{-1} \cdot M_{Rx}^{-1} \cdot M_{Tx}^{-1} \cdot M_{proj}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u \frac{\alpha b}{\Delta} \\ v \frac{\alpha b}{\Delta} \\ \frac{\alpha b}{\Delta} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y = -h + \frac{(v - v_0) b \cos \rho \cos \theta}{\Delta} - \frac{(u - u_0) b \sin \rho}{\Delta} + \frac{\alpha b \cos \rho \sin \theta}{\Delta} = 0 \implies \quad (7)$$

$$(v - v_0) = \frac{\tan \rho}{\cos \theta} \cdot (u - u_0) - \alpha \tan \theta + \left(\frac{h}{b \cos \rho \cos \theta} \right) \Delta \quad (8)$$

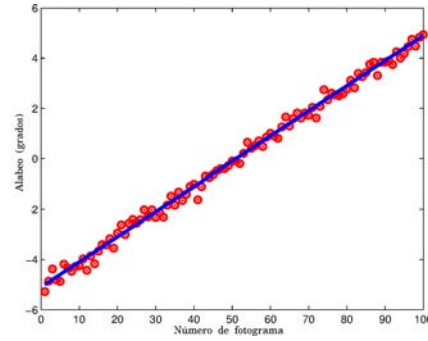
La ecuación (8) muestra la relación entre las coordenadas de la imagen (u, v) para los puntos pertenecientes a la calzada. Esta relación es lineal y puede expresarse mediante la ecuación de una recta como $v = C \cdot u + d$ para los diferentes valores de disparidad Δ . En entornos urbanos, el alabeo es habitualmente reducido, por lo que: $\cos \rho \approx 1$ y $\sin \rho \approx 0$, simplificando la expresión (8) y obteniendo (9). Esta nueva expresión (9) describe la relación entre la coordenada vertical de la imagen (v) y la disparidad (Δ) como otra línea recta, obtenida a través del v-disparity. Esta línea recta se conoce como perfil de la calzada [11], siendo $v = C_r \Delta + v_{\Delta 0}$, donde C_r es la pendiente y $v_{\Delta 0}$ es el valor de (v) cuando la disparidad es $\Delta = 0$. Una vez que el perfil de la calzada ha sido obtenido, es posible calcular el ángulo de cabeceo mediante (10) y la altura h empleando (11). En entornos urbanos, es habitual la presencia de obstáculos de gran tamaño que aumentan la complejidad del cálculo del perfil de la calzada. Para solucionarlo, en el método presentado, el perfil de la calzada se obtiene a partir de un v-disparity diferente. En lugar del mapa de disparidad original, el nuevo v-disparity se construye a partir del mapa libre [15], eliminando así los obstáculos.

$$v = \frac{h}{b \cos \theta} \cdot \Delta + v_0 - \alpha \tan \theta \quad (9)$$

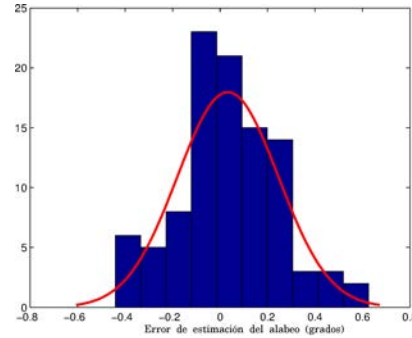
$$\theta = \arctan \left(\frac{v_0 - v_{\Delta 0}}{\alpha} \right) \quad (10)$$

$$h = C_r \cdot b \cdot \cos(\theta) \quad (11)$$

El siguiente objetivo consiste en estimar el ángulo de alabeo (ρ) . El trabajo presentado por Labayrade et al. [10] realiza varias proyecciones para estimar el valor del ángulo de alabeo. Según los autores, su implementación no supera 10 proyecciones y regresiones, pero aún así, la implementación resulta computacionalmente costosa. Sin embargo, es posible determinar el mapa libre que corresponde a un mapa de disparidad, donde únicamente el



(a)



(b)

Figura 2: Resultados de la evaluación de la estimación del alabeo. (a) Comparación entre la rotación real (línea azul) y la rotación estimada (puntos rojos) para cada imagen. (b) Histograma (columnas azules) y la distribución normal (líneas rojas) del error entre la rotación real y la rotación estimada.

suelo aparece delante del vehículo, a través del v-disparity como se detalla en [15]. Así, la ecuación (8) puede ser aplicada al mapa libre para detectar la recta $v = C u + d_{\Delta}$ para un valor fijo de disparidad Δ perteneciente a un área cercana al vehículo. Posteriormente, el alabeo puede ser estimado conociendo la pendiente C de la recta en el mapa libre mediante (12), evitando así realizar varias proyecciones.

$$C = \frac{\tan \rho}{\cos \theta} \implies \rho = \arctan (C \cos \theta) \quad (12)$$

La evaluación del método de estimación del ángulo de alabeo se realiza empleando una secuencia de imágenes sintéticas. El suelo aparece en las imágenes como un plano que rota en un rango entre ± 5 grados. La Fig. 2 muestra los resultados de esta evaluación, donde la mediana y la media del error son 0.0276 y 0.0331 grados respectivamente, y la desviación estándar se sitúa en 0.213 grados. Los detalles de la evaluación se muestran en la Fig. 2a, donde la línea azul se corresponde con la rotación gradual realizada sobre cada imagen (*ground truth*), y los puntos en rojo corresponden a los

resultados del método de estimación del ángulo de alabeo en cada imagen. Finalmente, la Fig. 2b muestra el histograma y la distribución normal del error en la estimación del ángulo alabeo.

3. APLICACIÓN DE LA AUTOCALIBRACIÓN A LA ODOMETRÍA VISUAL

El algoritmo presentado para la autocalibración de los parámetros extrínsecos del sistema estéreo se ha aplicado a nuestro método de odometría visual [16]. La estimación de la odometría visual se basa en el hecho de que el vehículo se desplaza el plano (2D) sobre el suelo. Este movimiento se estima mediante el seguimiento de puntos característicos [13] pertenecientes a la carretera entre imágenes consecutivas de la cámara izquierda, y transformando sus coordenadas de la imagen izquierda (u, v) a las del mundo (X, Z) . Una vez que las coordenadas de la imagen de los puntos característicos se han obtenido, la ec. (6) se resuelve con el fin de expresar X (13) y Z (14) como una función de las coordenadas de la imagen (u, v) , los parámetros intrínsecos y extrínsecos del sistema estéreo $\{\alpha, b, u_0, v_0, h, \rho, \theta\}$, y la disparidad (Δ) . Estas coordenadas del mundo X (13) y Z (14) no tienen información sobre la calibración de la desviación de la guiñada (ϕ) . La solución para la desviación de la guiñada es calcular X' y Z' usando (15) para poder estimar correctamente el movimiento del vehículo (Fig.1b).

$$X = \frac{b}{\Delta} (\cos \rho (u - u_0) + \cos \theta \sin \rho (v - v_0) + \alpha \sin \theta \sin \rho) \quad (13)$$

$$Z = \frac{b}{\Delta} (\alpha \cos \theta - \sin \theta (v - v_0)) \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Como se puede observar, tanto X (13) como Z (14) son función de la disparidad (Δ) , cuyo valor (5) es función de las coordenadas del mundo (X, Y, Z) . Por ello, es necesario obtener una nueva expresión para la disparidad (Δ) que cumplan los puntos pertenecientes a la carretera. Esta nueva expresión (16) se puede obtener de la ec. (7) donde se encuentra la relación entre la disparidad y las coordenadas de la imagen, los parámetros extrínsecos y los intrínsecos.

$$\Delta = \frac{b \cos(\rho) \cos(\theta)}{h} (v - v_0) - \frac{b \sin(\rho)}{h} (u - u_0) + \frac{\alpha b \cos(\rho) \sin(\theta)}{h} \quad (16)$$

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales para la estimación de la posición de la cámara y sus efectos en la estimación de la odometría visual se presentan en esta sección. La evaluación del método presentado se ha realizado mediante una base de datos de imágenes disponible públicamente [5] [9], que permiten evaluar algoritmos de odometría visual ya que dispone de información sobre el *ground truth* de la trayectoria del vehículo. Los resultados mostrados corresponden a la secuencia (2011_09_30_drive_0027) que se compone de 1100 imágenes donde un vehículo realiza una trayectoria cerrada en entorno urbano. A lo largo de la secuencia el vehículo recorre una distancia de 700 metros durante 5 minutos.

4.1. Resultados de la Autocalibración de los parámetros extrínsecos

Como se ha comentado anteriormente, la autocalibración se divide en dos fases: En primer lugar, la desviación de la guiñada se estima empleando el punto de fuga (sección 2.1). La calibración de la guiñada se ha realizado mediante el uso de distintas partes de secuencias donde el vehículo se desplaza en línea recta, obteniéndose un valor de desviación de -0.3 grados. A pesar del hecho de que el valor de la desviación de la guiñada parece ser reducido, produce una gran deformación en la trayectoria resultante como se discutirá en la siguiente sección (4.2). Una vez realizada la calibración de la guiñada, y asumiéndose constante a lo largo de la trayectoria, la siguiente etapa radica en estimar los parámetros extrínsecos restantes (h, ϕ, ρ) para cada imagen capturada usando para ello únicamente información visual.

El parámetro extrínseco que mejor permite evaluar la robustez del método de autocalibración es la altura (h) donde se sitúa el sistema estéreo. Los autores de la base de datos públicos especifican que la altura tiene un valor de aproximadamente 1.650 metros. La Fig. 3a muestra el histograma y la distribución normal de los resultados obtenidos en la estimación de la altura (h) a lo largo de toda la secuencia (1100 imágenes). Estos resultados presentan una media de 1.6404 metros y una mediana de 1.65 metros con una desviación estándar

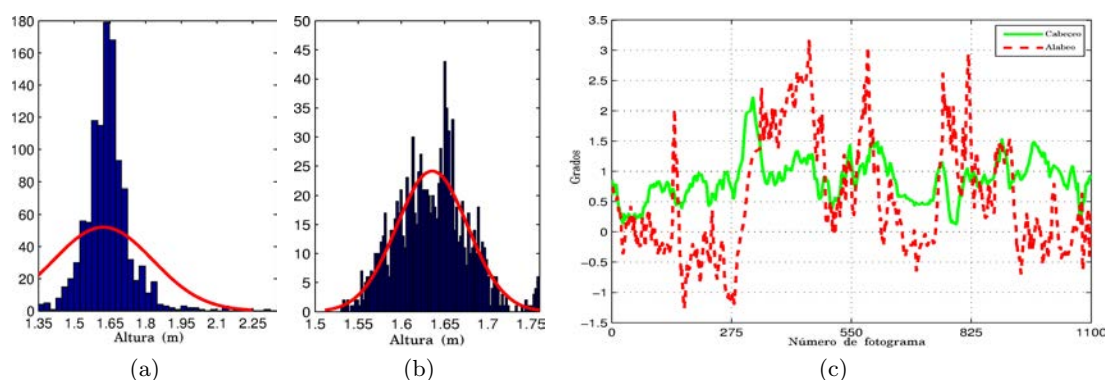


Figura 3: Resultados de la estimación de los parámetros extrínsecos a lo largo de la secuencia: (a) y (b) Histograma y distribución normal de los datos sin filtrar y filtrados, respectivamente. (c) Evolución del ángulo de cabeceo (línea verde) y ángulo de alabeo (línea roja discontinua) a lo largo de toda la trayectoria.

de 0.0875 metros. Las variaciones medidas en la altura se pueden deber a distintas circunstancias. Más allá de posibles valores atípicos aislados en la estimación de parámetros extrínsecos, la altura es una función de la carga en el vehículo o de baches y reductores de velocidad en la calzada. En comparación, si el v -disparity se construye mediante el uso del mapa de disparidad en lugar del mapa libre, la desviación estándar se eleva hasta 0.1383 metros.

Con el objetivo de reducir el número de valores atípicos y suavizar fluctuaciones no deseadas en la estimación de los parámetros extrínsecos se emplea un Unscented Kalman Filter (UKF) [8] (Fig.3c). La Fig. 3b muestra un nuevo histograma y distribución normal de datos filtrados para la altura (h), reduciendo la desviación estándar de los resultados a 0.0415 metros.

4.2. Efecto de la Autocalibración en la Odometría Visual.

El conocimiento del valor de la desviación de la guiñada (ϕ) y de las variaciones que se producen en cada uno de los parámetros extrínsecos restantes (h, ρ, θ) es una fuente de información útil aplicada a la odometría visual, ya que esta información permite reducir en gran medida el error en la estimación del movimiento del vehículo. La Fig. 5 representa las trayectorias resultantes del algoritmo de odometría visual, donde es posible observar los efectos del método de autocalibración en comparación con el *ground truth* (línea roja). Además, un análisis cuantitativo del error tanto en la traslación como en la rotación se muestra en la Fig. 4 y en la Tabla 1, donde también se detallan los valores del error final de la trayectoria.

En primer lugar, el efecto de la calibración de la

desviación de la guiñada se muestra en la Fig. 5a, donde la trayectoria resultante empleando la información de cada uno de los parámetros extrínsecos aparece en verde (Odometría autocalibrada), mientras que la trayectoria resultante si se ignora la desviación de la guiñada ($\phi = 0$) aparece en cian. Un valor reducido de la desviación de la guiñada produce un error de rotación importante a lo largo de la trayectoria (línea cian de puntos en la Fig. 4) y consecuentemente, un gran error de traslación al final de la trayectoria (5,72%).

En relación con los restantes ángulos de los parámetros extrínsecos (ángulo de alabeo (ρ) y ángulo de cabeceo (θ)), sus efectos sobre la trayectoria son diferentes. La autocalibración del alabeo, mejora en menor medida el resultado de la odometría visual que la autocalibración del cabeceo. La Fig. 5b muestra una comparación de las trayectorias resultantes con la trayectoria de odometría visual autocalibrada (línea verde) y el *ground truth* (línea roja), donde en la primera (línea naranja), el alabeo se ha fijado a ($\rho = 0$) y en la segunda (línea en magenta) el cabeceo también se ha fijado a ($\theta = 0$). Esta distinta influencia también se observa en la evolución del error tanto en la rotación como en la traslación a lo largo de la trayectoria (Fig.4). Finalmente, la adición del error debido a la no calibración del alabeo y el cabeceo (además del alabeo) produce un error de traslación de 2.87% y 16.51% respectivamente. Mientras que la estimación autocalibrada obtiene un error de traslación final de 1.16% (Tabla 1).

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un método de autocalibración de los parámetros extrínsecos de un sistema estéreo basado en la geometría de la calzada delante del

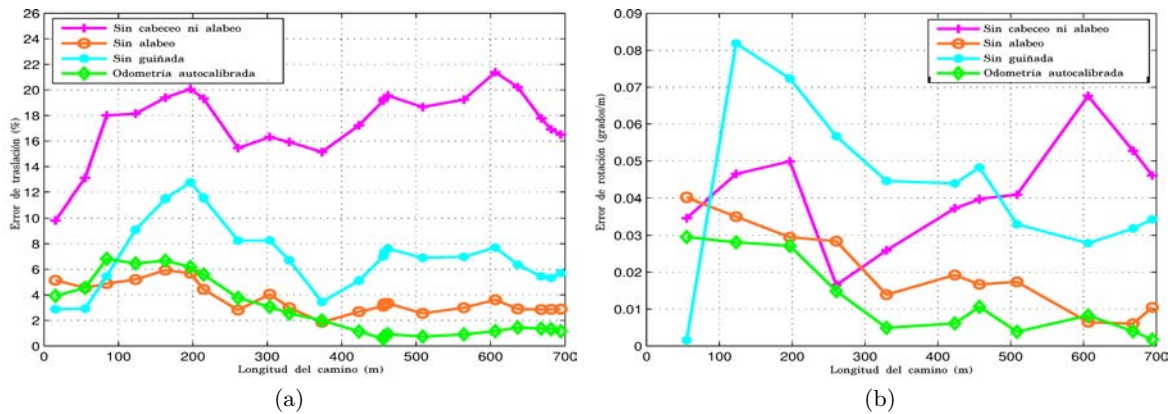


Figura 4: Comparación de los efectos del empleo de los parámetros extrínsecos en la evolución del error de traslación (a) y rotación (b) a lo largo de la trayectoria.



Figura 5: Trayectorias resultantes de la estimación de la odometría visual. (a) Comparación de la trayectoria obtenida sin la información de la desviación de la guiñada (línea cian) con la trayectoria autocalibrada (línea verde) y el *ground truth* (línea roja). (b) Comparación del efecto de ángulo de alabeo (línea naranja) y del ángulo de alabeo junto con el ángulo de cabeceo (línea magenta) en las trayectorias.

Tabla 1: Error de Traslación y Rotación Final de la Trayectoria

	Tran[m]	Rot[grados]	Tran[%]	Rot[grados/m]
Sin cabeceo ni alabeo	114.70	31.96	16.51	0.0460
Sin alabeo	19.97	7.24	2.87	0.0343
Sin guiñada	39.71	23.83	5.72	0.0104
Autocalibrada	8.04	1.23	1.16	0.0018

vehículo, aplicándose el mismo a entornos urbanos de tráfico. Este método mejora el presentado por Labayrade et al. [10], ya que el perfil de la calzada se obtiene por medio de un v-disparity sin obstáculos, que reduce el número de datos atípicos en el proceso de estimación. Además, el ángulo de alabeo puede ser obtenido sin la necesidad de realizar múltiples proyecciones con una precisión cercana 0.03 grados.

La aplicación del método de autocalibración a la odometría visual ha obtenido una considerable re-

ducción del error a lo largo de la trayectoria seguida por el vehículo, obteniéndose un error final de 1.16% en traslación y un error en rotación de 0.0018 grados por metro. Esta mejora en la estimación del trayectoria estimada por el algoritmo de odometría visual valida la mejora y la utilidad que el método de autocalibración puede suponer en su empleo en aplicaciones ADAS o de vehículos autónomos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España a través de los proyectos Cycit (TRA2013-48314-C3-1-R y TRA2015-63708-R), y por la Comunidad de Madrid a través del proyecto SEGVAUTO-TRIES (S2013/MIT-2713).

Referencias

- [1] Broggi, A., Bertozzi, M., and Fascioli, A. (2001). Self-calibration of a stereo vision system for automotive applications. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3698–3703. IEEE.
- [2] Collado, J., Hilario, C., de la Escalera, A., and Armingol, J. (2006). Self-calibration of an on-board stereo-vision system for driver assistance systems. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE*, pages 156–162. IEEE.
- [3] Fischler, M. and Bolles, R. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6):381–395.
- [4] Fraundorfer, F. and Scaramuzza, D. (2012). Visual odometry: Part ii: Matching, robustness, optimization, and applications. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 19(2):78–90.
- [5] Geiger, A., Lenz, P., and Urtasun, R. (2012). Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Providence, USA.
- [6] Hold, S., Gormer, S., Kummert, A., Meuter, M., and Muller-Schneiders, S. (2009). A novel approach for the online initial calibration of extrinsic parameters for a car-mounted camera. In *Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC'09. 12th International IEEE Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [7] Hu, Z., Lamosa, F., and Uchimura, K. (2005). A complete uv-disparity study for stereovision based 3d driving environment analysis. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2005. 3DIM 2005. Fifth International Conference on*, pages 204–211. IEEE.
- [8] Julier, S. J. and Uhlmann, J. K. (1997). New extension of the kalman filter to nonlinear systems. In *AeroSense'97*, pages 182–193. International Society for Optics and Photonics.
- [9] KIT (2013). The kitti vision benchmark suite.
- [10] Labayrade, R. and Aubert, D. (2003). A single framework for vehicle roll, pitch, yaw estimation and obstacles detection by stereovision. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings. IEEE*, pages 31–36. IEEE.
- [11] Labayrade, R., Aubert, D., and Tarel, J. (2002). Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through v-disparity representation. In *Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE*, volume 2, pages 646–651. IEEE.
- [12] Li, S. and Hai, Y. (2011). Easy calibration of a blind-spot-free fisheye camera system using a scene of a parking space. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 12(1):232–242.
- [13] Lowe, D. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2):91–110.
- [14] Marita, T., Oniga, F., Nedeveschi, S., Graf, T., and Schmidt, R. (2006). Camera calibration method for far range stereovision sensors used in vehicles. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE*, pages 356–363. IEEE.
- [15] Musleh, B., de la Escalera, A., and Armingol, J. M. (2012a). U-v disparity analysis in urban environments. In *Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2011*, volume 6928 of *LNCS*, pages 426–432. Springer.
- [16] Musleh, B., Martin, D., de la Escalera, A., and Armingol, J. M. (2012b). Visual ego motion estimation in urban environments based on uv disparity. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE*, pages 444–449. IEEE.
- [17] Scaramuzza, D. and Fraundorfer, F. (2011). Visual odometry [tutorial]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 18(4):80–92.
- [18] Scharstein, D. and Szeliski, R. (2002). A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International journal of computer vision*, 47(1):7–42.
- [19] Wang, Q., Zhang, Q., and Rovira-Mas, F. (2010). Auto-calibration method to determine camera pose for stereovision-based off-road vehicle navigation. *Environment control in biology*, 48(2):59–72.