

LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL.

M. Ibarra-Arenado^{1,2}, T. Tjahjadi³, S. Robla-Gómez², J.M. Pérez-Oria²

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, Santander, Cantabria, Avda. los Castros s/n, 39005, SPAIN

² Departamento de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Cantabria, Santander, Cantabria, Avda. los Castros s/n, 39005, SPAIN

³ School of Engineering, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UNITED KINGDOM
E-mail: [ibarra,srobla,oria]@teisa.unican.es, t.tjahjadi@warwick.ac.uk

Resumen

Una tarea fundamental dentro de los sistemas de detección de cambio de carril involuntario es la detección de las marcas viales longitudinales pintadas en el asfalto, ya sean continuas o discontinuas, así como de los límites de la vía. Los métodos de detección de estas características de la carretera basados en visión por computador, se dividen generalmente en dos etapas: extracción de las potenciales marcas viales longitudinales y ajuste de éstas a un modelo matemático. El presente artículo se centra en la primera, presentando un método para la detección del punto (vía recta) o puntos (vía curva) de fuga de la imagen. Los bordes de imagen cuya proyección pase por el punto de fuga, pertenecen a potenciales líneas de carril o límites de la carretera, siendo por lo tanto dicho punto una característica importante para la comprensión de la escena y detección del carril. Tras un filtrado basado en la orientación de los bordes de la imagen, los puntos de fuga se obtienen a partir de un proceso iterativo por votación. Ensayos realizados en tráfico urbano real muestran un comportamiento eficiente del método.

Palabras Clave: Visión por computador, detección de carril, sistemas de ayuda a la conducción.

1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de evitar accidentes debidos a cambios de carril involuntarios, incluyendo salidas de la vía e invasiones tanto del carril contrario como del contiguo, los sistemas de detección de cambio de carril (Lane Departure Warning, LDW) ayudan a mantener la trayectoria del vehículo dentro de la vía. Ante un posible cambio involuntario de carril, los sistemas LDW alertan al conductor mediante una señal sonora y/o acústica, o incluso haciendo vibrar el volante o el asiento del conductor. Una versión más avanzada son los sistemas de asistencia al mantenimiento de carril (Lane Keep Assistance, LKA), los cuales actúan sobre la dirección del vehículo, corrigiendo la trayectoria cuando el conductor no responde a las alertas

que le envía el sistema.

Una tarea fundamental dentro de los sistemas LDW y LKA es la detección de las marcas viales longitudinales pintadas en el asfalto, ya sean continuas o discontinuas, las cuales proporcionan la posición y orientación del vehículo dentro de la vía. Actualmente, los sistemas basados en visión por computador están jugando un papel muy importante dentro de los sistemas de ayuda a la conducción (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS). Las cámaras de bajo coste en comparación con otros dispositivos como el LIDAR, las unidades de procesamiento cada vez más potentes, los avances en los campos tanto del procesamiento de imagen como de la visión por computador, junto con el hecho de que los sensores ópticos son pasivos quedando exentos de los problemas de interferencia propios de los sensores activos, hace que los sistemas basados en visión sean un segmento creciente dentro de los sistemas ADAS.

Sin embargo, la detección de las líneas del carril mediante visión por computador supone un gran desafío. Aunque muchos métodos han sido propuestos, todavía es un campo de investigación activo, donde los esfuerzos se dirigen a lograr sistemas más fiables y rápidos. Son diversos los factores que dificultan la detección de las líneas de carril en una imagen. Por un lado, el ego-vehículo (vehículo en el que el sistema está instalado) está en movimiento, por lo que el escenario además de ser desconocido, está constantemente cambiando. Esto junto con la complejidad propia de la estructura de la carretera (rectas, curvas, cruces, rotondas, etc.) dificulta considerablemente la interpretación de la escena. Por otro lado, las marcas viales no son siempre visibles, lo cual puede deberse al desgaste de la vía, a parches en el asfalto o a la presencia de vehículos que las ocultan. Finalmente, los sistemas LDW y LKA operan en exteriores, estando muy condicionados por la iluminación, la cual es desconocida (día soleado, nublado, etc) e incontrolable. Ésta puede originar sombras y brillos en la carretera y en los objetos de la escena (líneas de carril, vehículos, etc.), lo que en la imagen puede ocasionar la unión aparente entre los mismos,

así como alterar sus características de intensidad, cromaticidad e incluso forma.

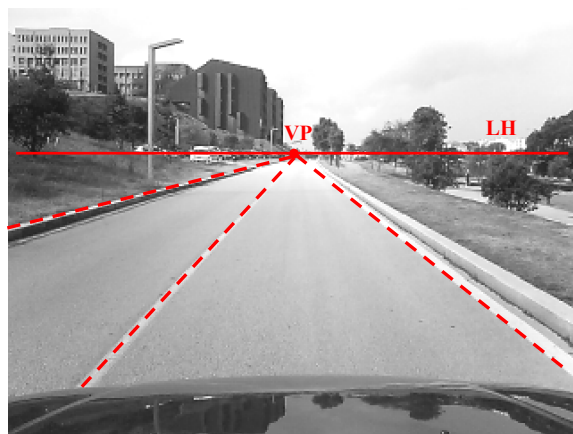
Los métodos de detección de carril basados en visión por computador se dividen generalmente en dos etapas [9]: extracción de las características de la carretera (líneas de carril y límites de la vía) y ajuste de éstas a un modelo. La primera consiste en identificar en la imagen las potenciales líneas de carril y/o bordes de la carretera, lo cual se lleva a cabo generalmente mediante técnicas de detección de bordes [2,4,6,7,12] o métodos basados en el gradiente [1,10]. La segunda etapa, consiste en ajustar las líneas detectadas a un modelo matemático, es decir, determinar la ecuación matemática de las líneas de carril [5,8,13,14]. De este modo, por una lado se verifican los bordes extraídos de la imagen que pertenecen a las líneas de carril o a los límites de la vía, y por el otro, permite conocer la trayectoria de la carretera, haciendo posible el guiado del ego-vehículo.

El presente artículo se centra en la primera etapa, presentando un método para extraer los bordes de la imagen que son potenciales marcas de carril o límites de la vía. Para ello se propone un método para la detección del punto (vía recta) o puntos (vía curva) de fuga de la imagen de carretera. El punto de fuga de una escena de carretera es aquel punto del plano de la imagen donde se cortan todas las líneas situadas sobre el plano de la carretera que en la realidad son paralelas a una dirección dada en el espacio la cual no es paralela al plano de proyección. De este modo, conociendo el punto de fuga de la imagen, es posible determinar todos los bordes de la misma que potencialmente pertenecen a las líneas del carril o a los límites de la vía. La extracción de dichos bordes es una de las fases críticas del proceso de detección del carril y de ella depende el correcto funcionamiento del sistema.

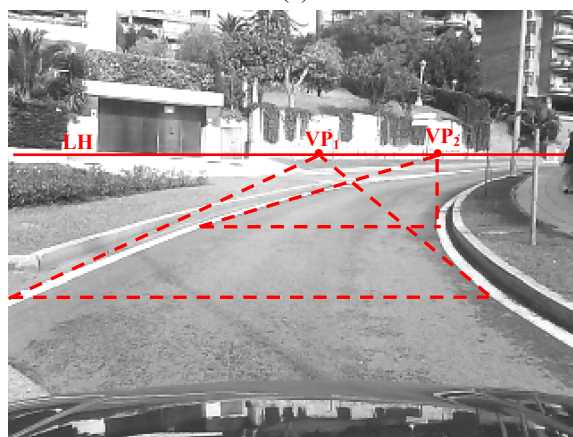
El resto del trabajo está organizado como sigue. En la Sección 2, se describe el método propuesto de detección del punto o de los puntos de fuga de la escena. En la sección 3 se presentan los resultados y finalmente, las conclusiones se muestran en la Sección 4.

2 DETECCIÓN DE LOS PUNTOS DE FUGA DE LA ESCENA.

La perspectiva cónica es el sistema de representación que más se aproxima a la perspectiva de una imagen de carretera típica de los sistemas ADAS. Las líneas que delimitan el carril de una vía son en la realidad líneas paralelas entre sí. Sin embargo, en el plano de la imagen, dichas líneas convergen en un punto en el infinito denominado punto de fuga, VP (ver Figura 1(a)). De la misma manera, el resto de líneas (reales o imaginarias) sobre el plano de la carretera que son



(a)



(b)

Figura 1. Línea de horizonte y punto/s de fuga. (a) Vía recta, y (b) vía curva.

en la realidad paralelas a las líneas del carril, se cortan en el mencionado punto de fuga.

Sin embargo, este hecho solo se produce cuando las líneas del carril son rectas. Para una línea curva no existe un único punto de fuga, sino infinitos, los cuales se sitúan a lo largo de una línea horizontal localizada en el infinito, denominada línea del horizonte, LH (ver Figura 1(a) y 1(b)). La línea del horizonte es el lugar geométrico del espacio en el cual se encuentran todos los puntos de fuga correspondientes a las diferentes direcciones de las rectas situadas sobre el plano de la carretera. Es una recta horizontal sobre el plano de proyección, resultado de la intersección de dicho plano con el plano horizontal que pasa por el punto de vista del sistema proyectivo.

De este modo, cada punto de una línea curva tiene su propio punto de fuga, el cual es resultado de la intersección de la recta tangente a la curva en dicho punto y la línea del horizonte (ver Figura 1(b)). Ahora bien, para una imagen de carretera en la que el carril describe una curva, es muy complejo determinar todos los puntos de fuga de la escena. Sin embargo, si se

consideran pequeños arcos de la curva, éstos se pueden aproximar como rectas, de tal modo que en la imagen se establecen tantos puntos de fuga como tramos de arco hayan sido considerados (ver Figura 2(a) y 2(b)).

El conocimiento de los puntos de fuga es por lo tanto, una información muy valiosa de la escena para la detección del carril. Todos los bordes de la imagen, cuyas proyecciones pasen por el punto de fuga (correspondiente a su tramo) son candidatos a pertenecer a una línea de carril o a una línea límite de la vía, mientras que todos aquellos cuyas proyecciones no pasen por el punto quedan descartadas como tal.

En el presente trabajo, se establecen tres tramos en la carretera, por lo que si la escena es una curva, se tendrán tres puntos de fuga situados sobre la línea de horizonte. En cambio si la carretera es una recta, los tres puntos de fuga coinciden en el infinito. El proceso de detección del punto de fuga correspondiente a cada tramo es idéntico.

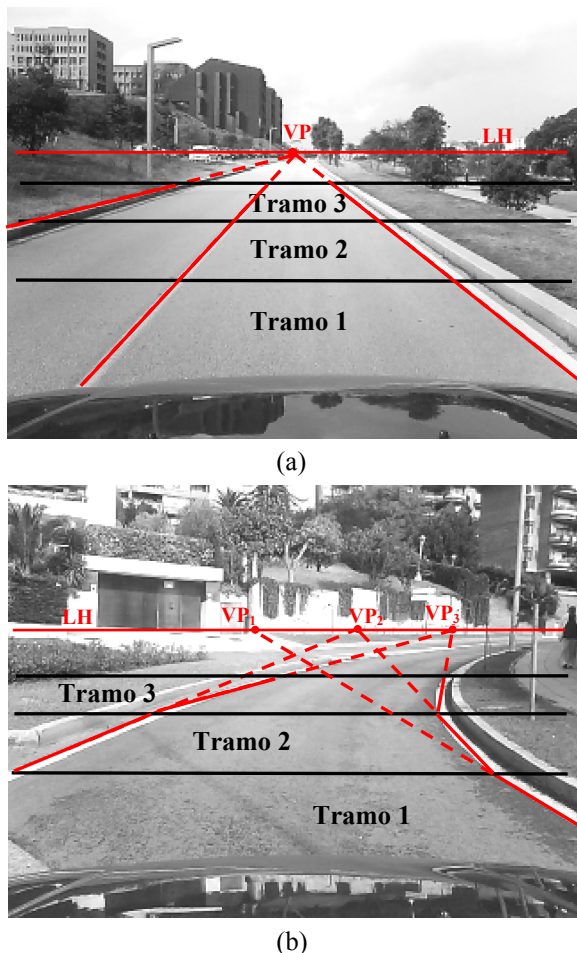


Figura 2. División de la imagen en tres tramos. (a) Vía recta donde el punto de fuga de cada tramo coincide, VP , y (b) vía curva, donde a cada tramo 1, 2 y 3 le corresponde un un punto de fuga, VP_1 , VP_2 y VP_3 , respectivamente.

2.1 REGIÓN DE INTERÉS

Con el fin de simplificar la escena, el sistema se centra en una región de interés (ROI) de la imagen adquirida en escala de grises. La ROI corresponde al área de la carretera frente al ego-vehículo que se encuentra situada por debajo de la línea del horizonte aproximada (ver Figura 3(a) y 3(b)), la cual se establece asumiendo condición de tierra plana. De este modo, se excluyen de la imagen todos aquellos elementos que por su situación en la imagen, se tiene la certeza de que no son líneas de carril o límites de la vía (ver Figura 3(a) y 3(b)). Por otro lado, se establece una región en la imagen entorno a la línea del horizonte aproximada, donde la probabilidad de localizar los puntos de fuga de la escena es muy elevada [11] (salvo en situaciones en las que el ego-vehículo se aproxima a un tramo de la vía con una pendiente hacia arriba muy pronunciada o en un cambio de rasante). Los cambios de rasante son situaciones muy

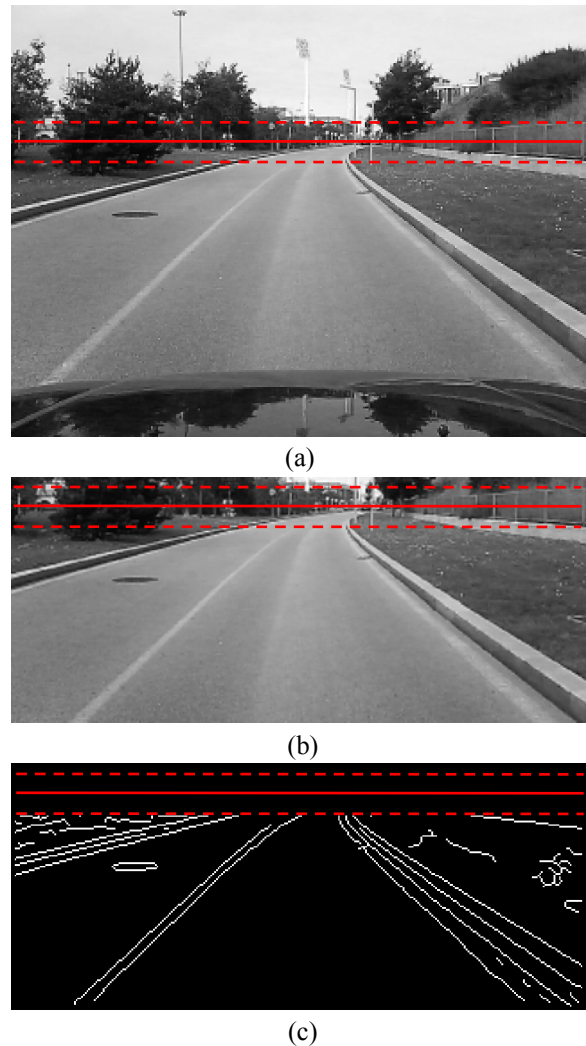


Figura 3. Línea del horizonte aproximada y región de máxima probabilidad de localización de los puntos de fuga, (a) en la imagen adquirida, (b) en la región de interés, y (c) en la máscara de bordes M .

complejas para los sistemas de detección de líneas de carril, independientemente de la metodología propuesta para su detección. Esto se debe a que el tramo de la carretera más alejado del ego-vehículo no aparece en la imagen. Por lo que el único modo de la estimación de las líneas es mediante métodos predictivos.

2.2 FLTRADO POR ORIENTACIÓN

Antes de comenzar el proceso de detección de los puntos de fuga, con el fin de reducir ruido de la ROI, se aplica un filtro paso bajo con una máscara 3x3. Posteriormente, el mapa de bordes M es extraído aplicando el operador Canny [3] (ver Figura 3(c)). En la máscara M aparecen todos los bordes de la imagen independientemente de si pertenecen a las marcas viales, a los bordillos o a cualquier otro elemento de la escena. Sin embargo, para la detección de aquellos que corresponden a las líneas de carril o límites de la vía se dispone de cierto conocimiento previo de la escena.

Debido a la perspectiva, la orientación de las líneas de carril y límites de la vía no es, a priori, completamente desconocida. Aún con el ego-vehículo incorrectamente alineado en la carretera o circulando por una curva, los puntos de fuga de la imagen, por lo general, se localizan horizontalmente en la región central de la línea del horizonte. Esto hace que la orientación, θ de dichas líneas se mantenga dentro de un rango de ángulos en función de la posición que ocupe en la imagen (ver Figura 4). Así, si suponemos el punto de fuga en el centro exacto de la línea del horizonte, la orientación, θ de la línea izquierda del carril podrá variar únicamente entre los valores de 0 y 90°, mientras que la orientación de la línea derecha estará comprendida entre 90 y 180° (ver Figura 4). Sin embargo, el punto de fuga no tienen por que estar en el centro exacto de la línea del horizonte sino que puede estar desplazados. Este es el caso en el que el ego-vehículo está o bien levemente desalineado de la vía, o bien circulando en una curva.

No obstante, esta información es muy útil para descartar elementos de la escena que por su orientación,

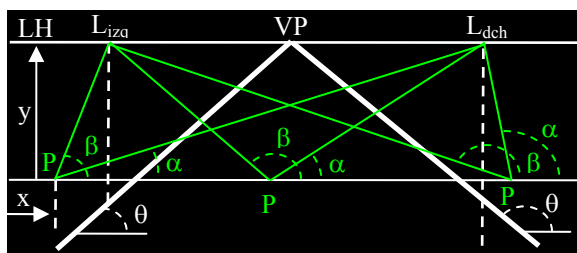


Figura 4. Orientación, θ de cada punto perteneciente a una línea de carril o límite de vía en función de su localización en la imagen.

claramente no corresponden con las líneas del carril o con los límites de la vía. De este modo, se propone un filtrado por orientación de cada punto perteneciente a cada elemento presente en la máscara de bordes.

En primer lugar, se establecen dos límites, izquierdo, L_{izq} y derecho, L_{dch} (ver Figura 4) sobre la línea del horizonte aproximada, entre los cuales la probabilidad de encontrar situados los puntos de fuga de la escena es muy elevada, incluso si el ego-vehículo transita por una curva cerrada. De este modo, cualquier punto perteneciente a un borde de la imagen cuya orientación presente un valor fuera del intervalo $[\alpha, \beta]$, será descartado como punto del borde perteneciente a una línea de carril o límite de vía. Para cada punto de borde (x, y) de la máscara, M tenemos que,

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & \alpha(x, y) \leq \theta(x, y) \leq \beta(x, y) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

donde,

- si $x < L_{izq}$,

$$\alpha = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{L_{izq} - x} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{L_{dch} - x} \quad (3)$$

- si $L_{izq} \leq x \leq L_{dch}$,

$$\alpha = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{izq}} \quad (4)$$

$$\beta = 180 - \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{dch}} \quad (5)$$

- si $L_{dch} < x$

$$\alpha = 180 - \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{izq}} \quad (6)$$

$$\beta = 180 - \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{dch}} \quad (7)$$

y donde el ángulo de orientación, θ de cada punto de borde se obtiene a partir de sus gradientes horizontal y vertical de intensidad,

$$\theta = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{dx}{dy} \quad (8)$$

donde,

$$dx = I(i+1, j-1) + I(i+1, j) + I(i+1, j+1) - (I(i-1, j-1) + I(i-1, j) + I(i-1, j+1)) \quad (9)$$

$$dy = I(i-1, j-1) + I(i, j-1) + I(i+1, j-1) - (I(i-1, j+1) + I(i, j+1) + I(i+1, j+1)) \quad (10)$$

y donde I es la región de interés en escala de grises. Así, en la máscara de bordes permanecen aquellos puntos cuya orientación satisface la condición de

orientación (ver Figura 5(a)). Posteriormente, se lleva a cabo un agrupamiento de píxeles por cercanía, con el fin de unir aquellos bordes correspondientes a líneas de carril o límites de vía que inevitablemente hayan perdido algún punto en el filtrado (ver Figura 5(b)), tras lo cual se realiza un filtrado por tamaño de los elementos de M (ver Figura 5(c)).

2.3 DETECCIÓN DE LOS PUNTOS DE FUGA

Una vez descartados aquellos bordes de la máscara, M que por su orientación es improbable que pertenezcan a líneas de carril o límites de la vía, el siguiente paso del proceso es el cálculo de los puntos de fuga de la escena a partir de los segmentos remanentes en M .

En primer lugar se establecen tres regiones en la ROI (ver Figura 5(c) y Figura 6(a), 6(b) y 6(c)), a cada cual le corresponde un punto de fuga. Los tramos establecidos son de distintas dimensiones. El *Tramo 1*, el cual es el más cercano al ego-vehículo, es considerado de mayor tamaño porque aún circulando en una curva, las líneas del carril son prácticamente

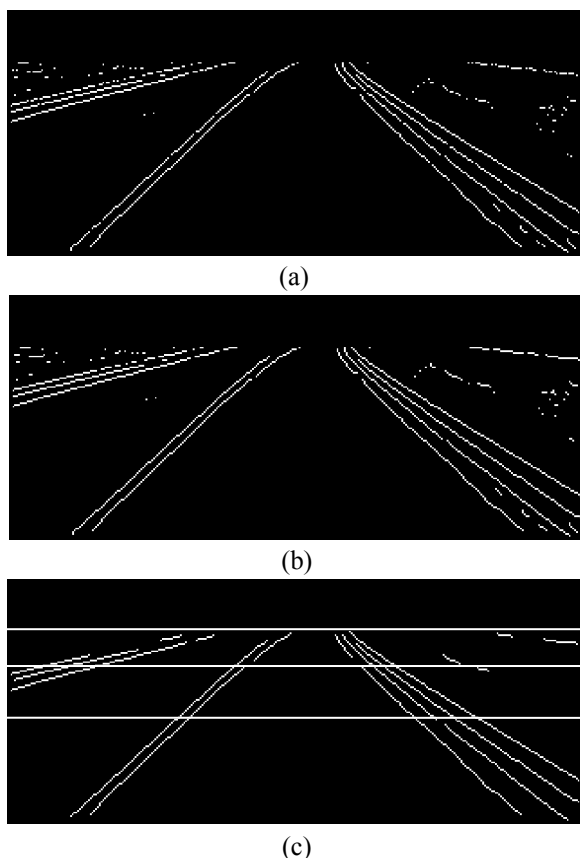


Figura 5. Máscara de bordes M de la Figura 3(c), (a) tras el filtrado por orientación, (b) tras el agrupamiento de píxeles, y (c) tras el filtrado por tamaño y establecimiento de los tramos.

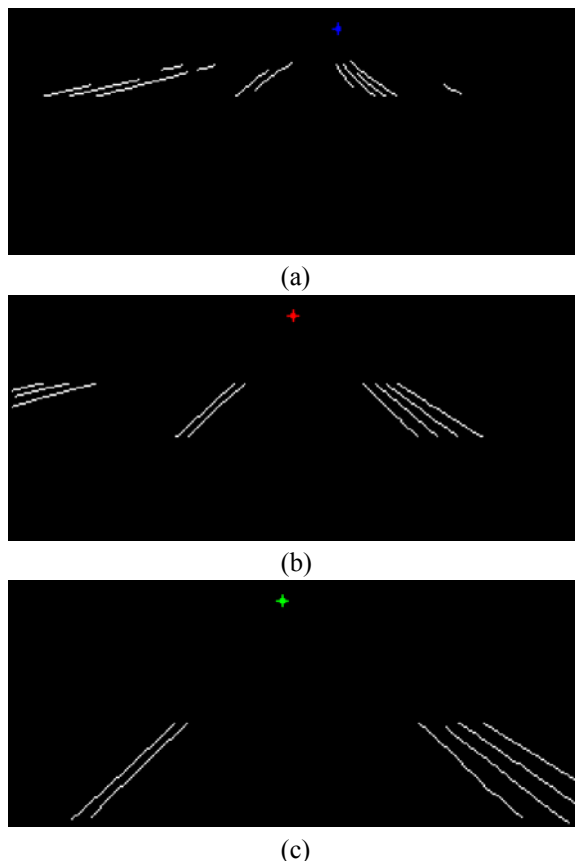


Figura 6. Puntos de fuga obtenidos para cada tramo, (a) Tramo 3, (b) Tramo 2, y (c) Tramo 1.

rectas en la imagen debido al efecto de la perspectiva (ver Figura 2(b)). Los *Tramos 2* y *3*, son menores porque a distancias más alejadas la curvatura de las líneas es apreciable. El tamaño de los tres tramos es establecido en base al conocimiento previo de la escena, incluyendo la altura y ángulo tilt de la cámara situada en el ego-vehículo, así como asumiendo condición de tierra plana. En este trabajo el Tramo 1 es una región de la imagen de 320x60 mientras que el Tramo 2 y el Tramo 3 son de 320x30 y 320x20, respectivamente.

La detección del punto de fuga de cada tramo se lleva a cabo mediante un proceso iterativo por votación. Para ello, se calculan todos los puntos de intersección entre todos los segmentos de línea remanentes en el tramo y se calcula el centro geométrico de dichos puntos. A partir de dicho centro geométrico de los puntos de intersección se establece un margen de distancia, T , de modo que todos los segmentos de la máscara cuya proyección pase a una distancia superior a T son descartados como bordes correspondientes a líneas de carril o límites de vía. Con la nueva máscara M , el proceso se repite sucesivamente hasta que se obtiene una máscara de bordes final que no presente ningún segmento descartado, situación en la cual, el centro geométrico de intersección de la última

iteración es considerado finalmente como el punto de fuga del tramo bajo análisis (ver Figura 6(a), 6(b) y 6(c)).

La ecuación de cada segmento se calcula mediante su pendiente, m y las coordenadas de su centroide, $P_c(x_c, y_c)$, obtenidos sendos parámetros partir de los puntos extremos del segmento $P_i(x_i, y_i)$ y $P_f(x_f, y_f)$,

$$m = \tan \frac{y_f - y_i}{x_f - x_i} \quad (11)$$

$$P_c(x_c, y_c) = P_c \left(\frac{x_f - x_i}{2}, \frac{y_f - y_i}{2} \right) \quad (12)$$

Para calcular los puntos de intersección en cada iteración, a cada punto obtenido se le asigna un peso determinado en función de las longitudes y de las orientaciones de los segmentos empleados para su cálculo.

La longitud de los segmentos es un factor importante. Cuanto más largos son los segmentos, mayor precisión se tiene a la hora de determinar sus ecuaciones y por lo tanto la precisión en la obtención del punto de fuga será mayor.

Por otro lado, la precisión del punto de fuga es mayor cuanto más difiere la pendiente de las rectas que interseccionan. Así, por ejemplo, el punto de intersección entre una de las rectas correspondientes al carril izquierdo y una de las rectas correspondientes al carril derecho, estará más próximo al punto de fuga real que el punto de intersección de dos rectas correspondientes a uno de los dos lados de la escena, cuyas pendientes son más parecidas. De este modo, si la pendiente de una de las rectas satisface que $0 < \theta < 90$ y la otra $90 < \theta < 180$, el peso asignado al punto de intersección obtenido es mayor que si las pendientes de las dos rectas cumplen $0 < \theta < 90$ o $90 < \theta < 180$.

Una vez finalizado el proceso, los bordes remanentes en la máscara M , son los finalmente clasificados como potenciales bordes correspondientes a líneas de carril o límites de la vía (ver Figura 6(a), 6(b), 6(c)), 7(a), 7(b) y 7(c)).

4 RESULTADOS

El sistema fue instalado en un vehículo preparado al efecto y fue probado en tráfico urbano real en Santander, Cantabria. La videocámara empleada fue una Trust Widescreen HD WebCam, 8 bit pixel, auto balance de blancos y tiempo de exposición automático, la cual proporcionó imágenes a color con una resolución de 240x320. Las imágenes fueron adquiri-

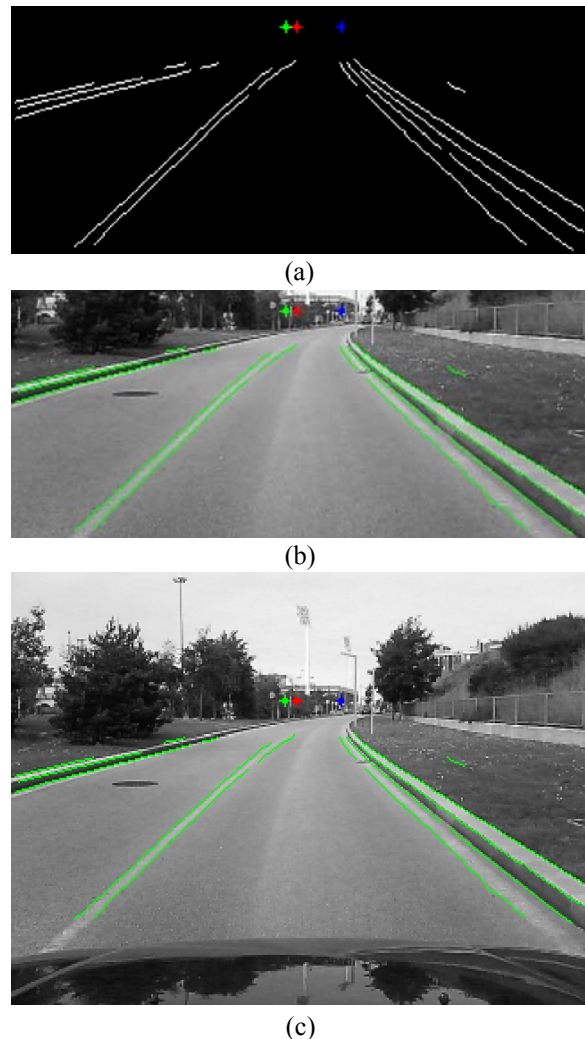


Figura 7. Puntos de fuga en: (a) la máscara de bordes potencialmente correspondientes a líneas del carril o límites de la vía, (b) la ROI, y (c) en la imagen inicial adquirida.

das y procesadas en Matlab® sobre un ordenador portátil standard.

Un total de 6.600 imágenes de la carretera, en 22 video secuencias de 300 imágenes cada una, fueron adquiridas y almacenadas en diferentes condiciones atmosféricas. La Figura 8 muestra el resultado del algoritmo de detección de los puntos de fuga y bordes correspondientes a potenciales líneas de carril y límites de vía, los cuales se muestran sobrepuestos en color verde en la imagen original. El método se comprobó en todas las imágenes.

Como se aprecia, la mayor parte de los bordes generados por las líneas de carril así como por los límites de vía son correctamente detectados por el método como potenciales bordes de dichos elementos. Sin embargo, también se aprecia que algunos de los bordes aparecen incompletos. Esto se debe principal-



Figura 8. Ejemplos de la estimación de los puntos de fuga en diferentes tipos de vía urbana y diferentes condiciones de iluminación. En la imagen superior de cada ejemplo se muestra la imagen original con los potenciales bordes de carril y límites de vía sobreimpresionados en verde, mientras que en la imagen inferior se muestran dichos bordes en la ROI. En ambas imágenes se muestran los puntos de fuga estimados de los tres tramos.

mente al método de agrupamiento de bordes basado en la cercanía, el cual presenta dificultades en la unión de tramos de bordes demasiado separados. Con el fin de evaluar el comportamiento cuantitativo, se determinaron manualmente los bordes correspondientes a las líneas de carril y a los límites de la carretera de un conjunto de diez imágenes de la colección. Estos bordes fueron obtenidos a partir de la máscara de bordes, M determinada mediante el algoritmo de Canny. La evaluación se llevó a cabo comparando dichos bordes con los proporcionados por el método. Los resultados mostraron una tasa de detección de positivos PR igual al 78,76%, obtenida mediante,

$$PR(\%) = \frac{P}{V} \cdot 100, \quad (13)$$

donde V es el número total de píxeles pertenecientes a bordes de línea de carril y límites de vía y P es el número de píxeles de borde de dichos elementos proporcionado por el método propuesto. Como se ha comentado, esta pérdida de píxeles de los bordes se debe principalmente al método de agrupamiento de bordes basado en la cercanía.

Por otro lado, debido a la dificultad de obtener “manualmente” los puntos de fuga reales de las imágenes adquiridas, la comprobación de estos se realizó por observación, sin aportar datos experimentales. Como se aprecia, el método de detección de dichos puntos es bastante fiable y preciso. Esto lo demuestra el hecho de que en la gran mayoría de los casos, los tres puntos de fuga se sitúan a unas alturas muy similares

de la imagen, describiendo la línea del horizonte real de las escenas.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado un método para detección de los puntos de fuga en imágenes de carretera típicas de los sistemas ADAS. El conocimiento de los puntos de fuga de la escena permite detectar los bordes de la imagen que son candidatos a pertenecer a una línea de carril o a un límite de la vía.

El método propuesto presenta un comportamiento eficiente tanto en la detección de los puntos de fuga como en la de los bordes correspondientes a las líneas de carril y a los límites de la vía. Sin embargo se produce una cierta pérdida de píxeles de los bordes de estos elementos, debida al método de agrupamiento por cercanía empleado.

Como trabajo futuro se abordará en primer lugar el desarrollo de un método de agrupamiento de segmentos de bordes que permita un comportamiento más robusto que el actual. En segundo lugar, nos centraremos en el desarrollo de un método para la verificación de los potenciales bordes de las líneas del carril y de los límites de la vía.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo el patrocinio del Ministerio de Economía y Competitividad. (Proyecto: DPI2012-36959).

Referencias

- [1] Bertozzi, M., (1998) GOLD: a parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection, *IEEE Transactions on Image Processing*, (7), pp. 62-81.
- [2] Beucher, S., Bilodeau, M. (1994), "Road segmentation and obstacle detection by a fast watershed transformation", *in: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, pp. 296-301.
- [3] Canny, J., (1986) A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (8), pp. 679-698.
- [4] Dickmanns, E.D., (1997), "Vehicles capable of dynamic vision", *in: International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1577-1592.
- [5] Dickmanns, E.D., Mysliwetz, B.D., (1992) "Recursive 3-D Road and Relative Ego-State Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, pp. 199-213.
- [6] Kluge, K., Thorpe, C., (1992), "Representation and Recovery of Road Geometry in Yarf", *in: Proc. IEEE Symp. Intelligent Vehicles*, pp. 114-119.
- [7] Koseckis, R., Blasi, C.J., Taylor, J., Malik, J., (1998), "A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving", *in: IEEE International Conference on Robotics And Automation*
- [8] Kreucher, C., Lakshmanan, S (1999), "LANA: A Lane Extraction Algorithm that uses Frequency", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol 15, pp. 343-350.
- [9] Martín, D., García, F., Musleh, B., Olmeda, D., Peláez, G., Martín, P., Ponz, A., Rodríguez, C., Al-Ka, A., De la Escalera, A., et al. (2014) IVVI 2.0: An intelligent vehicle based on computational perception, *Expert Systems with Applications* 41(17), pp. 7927-7944.
- [10] Pomerleau, D., (1995), "RALPH: Rapidly adapting lateral position handler", *in: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, Detroit, pp. 506-511.
- [11] Suttorp, T y Bücher, T. (2006) "Robust vanishing point estimation for driver assistance", *in: IEEE Proc. Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 1550-1555.
- [12] Thorpe, C., Hebert, M. H., Kanade, T., Shafer, S.A., (1988), "Vision and navigation for Carnegie-Mellon Navlab", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, pp. 506-511.
- [13] Wang, Y., Shen, D., Teoh, E.K., (2000) "Lane Detection Using Spline Model", *Pattern Recognition Letters*, vol. 21, pp. 677-689.
- [14] Yuille, A.L., Coughlan, J.M., (2000), "Fundamental Limits of Bayesian Inference: Order Parameters and Phase Transitions for Road Tracking", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, pp. 160-173.