

Capítulo 3: Contornos Activos

3.1. Introducción

Como se ha comentado en el capítulo anterior, un método de segmentación es el de los modelos deformables o contornos activos.

Desde que fueron introducidos por Kass y colaboradores [2.1] en 1987, los contornos activos o Snakes han ganado popularidad y se han convertido en una herramienta eficaz en numerosas tareas relacionadas con el procesamiento y el análisis de imágenes como pueden ser, entre otras, la segmentación y el seguimiento de objetos móviles o su deformación.

Un contorno activo (comúnmente llamado Snake) consiste en una curva elástica aproximada que, colocada sobre una imagen, empieza a deformarse a partir de una forma inicial con el fin de delimitar las regiones de interés en la escena. Esta deformación se produce mediante la aplicación de fuerzas internas, intrínsecas al Snake y que controlan la suavidad de la curva, así como mediante fuerzas externas, procedentes de la imagen bajo tratamiento, que empujan al Snake hacia las características salientes de la imagen. Esta característica convierte a los modelos deformables en una herramienta eficaz en múltiples tareas, como por ejemplo, en el análisis de imágenes médicas, donde la baja relación señal/ruido hace insuficientes los resultados obtenidos mediante técnicas clásicas.

3.2. Planteamiento clásico: Minimización de la Energía

Geoméricamente, una Snake es un contorno paramétrico $v(s,t)=(x(s,t),y(s,t))^t$, variable en el tiempo y definido en el plano de la imagen $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, donde las coordenadas $x(s,t)$, $y(s,t)$ del contorno son funciones de la variable paramétrica $s \in [0,1]$, y del tiempo t . El contorno se supone cerrado, a través de condiciones de contorno.

La forma del contorno se expresa mediante la siguiente funcional de energía E , la cual se debe ser minimizada con el fin de determinar la forma y posición final de la Snake:

$$E_{total} = \int_0^1 E(v(s))ds = \int_0^1 (E_{int}(v(s)) + E_{ext}(v(s)))ds \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$E_{int} = \alpha(s) \left| \frac{\delta v}{\delta s} \right|^2 + \beta(s) \left| \frac{\delta^2 v}{\delta s^2} \right|^2 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

E_{int} y E_{ext} corresponden a los términos de energía interna y externa, respectivamente. E_{int} da las características de deformación del contorno elástico y las funciones $\alpha(s)$ y $\beta(s)$ determinan el grado en el cual la Snake se puede estirar o curvar. Estas funciones son útiles para manipular el comportamiento físico y la continuidad local del modelo. Así, por ejemplo, un aumento en la magnitud de $\alpha(s)$ da lugar a incrementos en la tensión de la curva, con lo que se tiende a eliminar lazos o rizos mediante reducción de la longitud de contorno. Por otra parte, el aumento de $\beta(s)$ incrementa la rigidez del Snake, haciéndolo más suave en su forma y menos flexible.

Estas funciones, $\alpha(s)$ y $\beta(s)$, pueden ser dependientes de s , longitud de la curva, y ajustándolos es posible cambiar las características de la Snake en cada coordenada paramétrica. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones especifican valores constantes a lo largo del contorno para α y β .

E_{ext} consiste de los potenciales de energía externa que acoplan la Snake a la imagen, para lo cual se diseñan de manera que sus mínimos locales coincidan con extremos de intensidad, bordes, o cualquier otra característica de interés en la imagen.

El proceso de minimizar la función dada en la ecuación 3.1 (Ec. 3.1) se puede considerar desde un punto de vista dinámico a través de la ecuación lagrangiana de movimiento para la Snake, como:

$$-\frac{\delta}{\delta s} \left(\alpha \frac{\delta v}{\delta s} \right) + \frac{\delta^2}{\delta s^2} \left(\beta \frac{\delta^2 v}{\delta s^2} \right) = -\nabla E_{ext}(v(s)) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Sustituyendo los términos de $v(s)=(x(s),y(s))$, se obtienen dos pares de ecuaciones Euler-Lagrange independientes:

$$-\alpha \frac{d^2 x}{ds^2} + \beta \frac{d^4 x}{ds^4} + \frac{\delta E_{ext}}{\delta x} = 0 \quad (\text{Ec.3.4})$$

$$-\alpha \frac{d^2 y}{ds^2} + \beta \frac{d^4 y}{ds^4} + \frac{\delta E_{ext}}{\delta y} = 0 \quad (\text{Ec.3.5})$$

Para resolver estas ecuaciones se discretizan quedando de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} &\alpha_i (v_i - v_{i-1}) - \alpha_{i+1} (v_{i+1} - v_i) + \beta_{i-1} (v_{i-2} - 2v_{i-1} + v_i) - \\ &- 2\beta_i (v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1}) + \beta_{i+1} (v_i - 2v_{i+1} + v_{i+2}) + \\ &(fx(i), fy(i)) = 0 \end{aligned} \quad (\text{Ec.3.6})$$

Siendo $fx(i)=\delta E_{ext}/\delta x$ y $fy(i)=\delta E_{ext}/\delta y$.

Estas ecuaciones se pueden rescribir de forma matricial quedando de la siguiente forma:

$$A\vec{x} + f_x(x, y) = 0 \quad (\text{Ec.3.7})$$

$$A\vec{y} + f_y(x, y) = 0 \quad (\text{Ec.3.8})$$

Donde **A** es una matriz pentadiagonal.

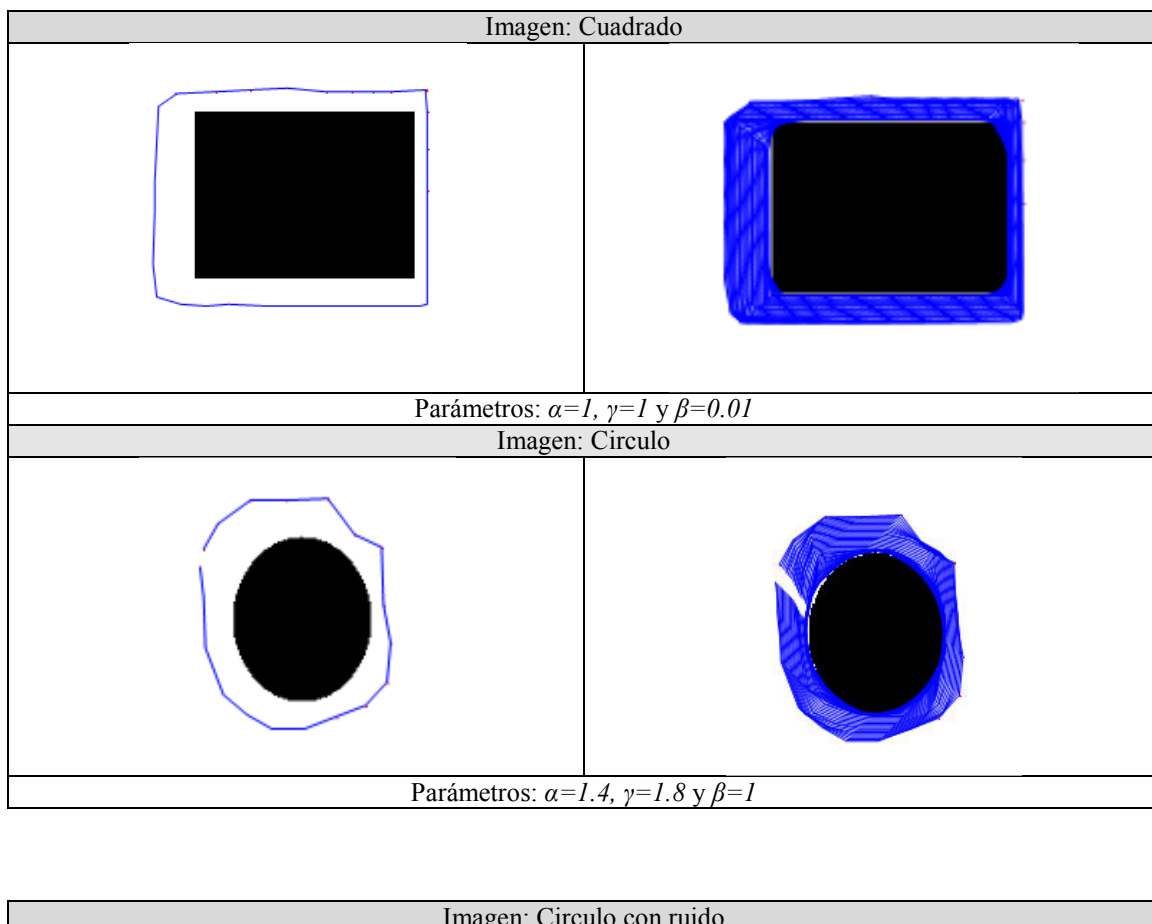
A partir de las ecuaciones 3.7 y 3.8 (Ec.3.7, Ec.3.8) se pueden obtener las nuevas posiciones de los nodos de la Snake de la siguiente forma:

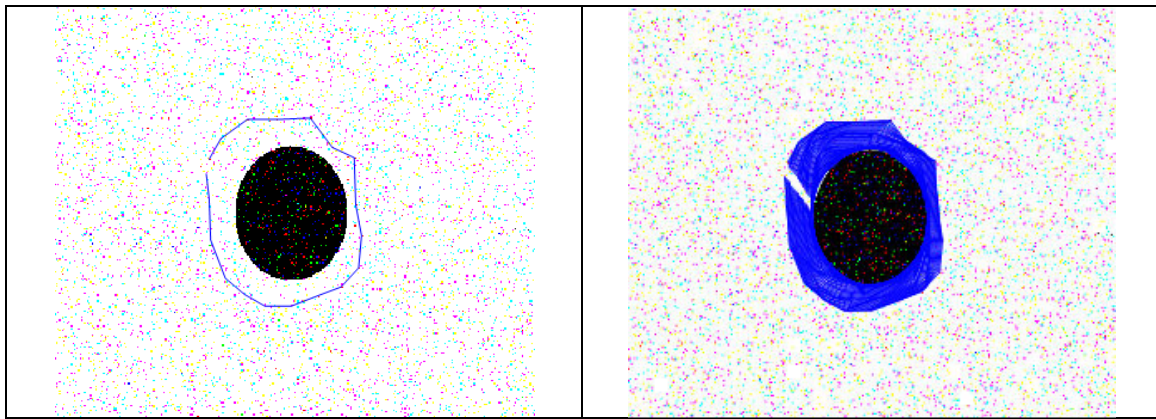
$$x_t = (A + \gamma I)^{-1} (\gamma x_{t-1} - f_x(x_{t-1}, y_{t-1})) \quad (\text{Ec.3.9})$$

$$y_t = (A + \gamma I)^{-1} (\gamma y_{t-1} - f_y(x_{t-1}, y_{t-1})) \quad (\text{Ec.3.10})$$

3.3. Ejemplos de funcionamiento

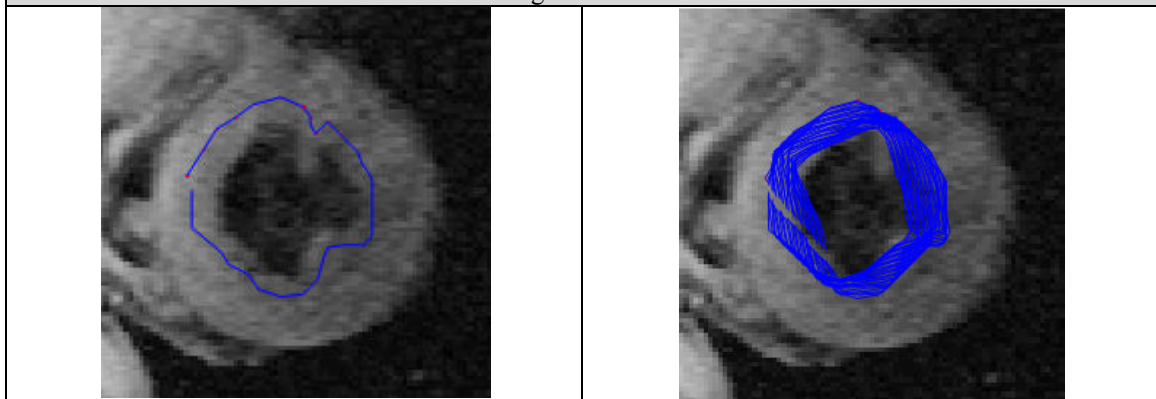
A continuación se representa el resultado de aplicar el método de segmentación por contornos activos a varias imágenes. Las imágenes de la izquierda muestran el contorno inicial situado alrededor del objeto de interés, mientras que las de la derecha muestran la superposición de las distintas iteraciones, en la que se puede ver la deformación de la Snake hasta el momento en que converge.





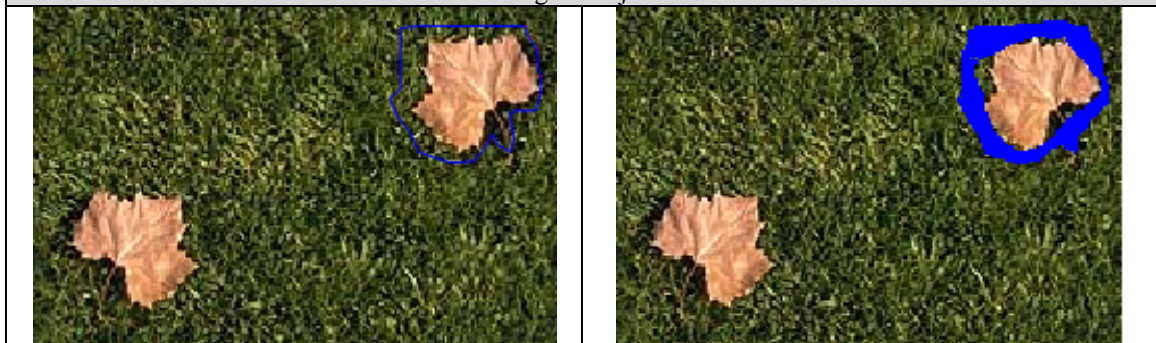
Parámetros: $\alpha=1.4$, $\gamma=1.8$ y $\beta=1$

Imagen: Corazón



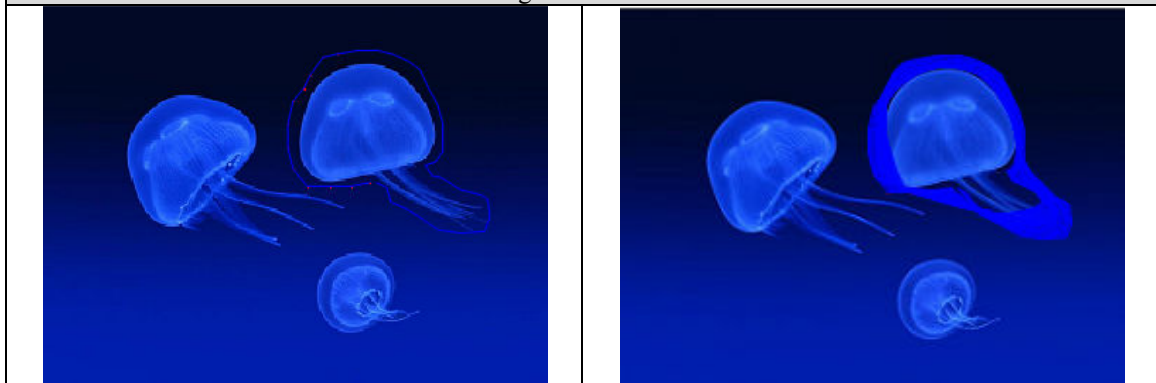
Parámetros: $\alpha=1$, $\gamma=1$ y $\beta=0.01$

Imagen: Hojas 2

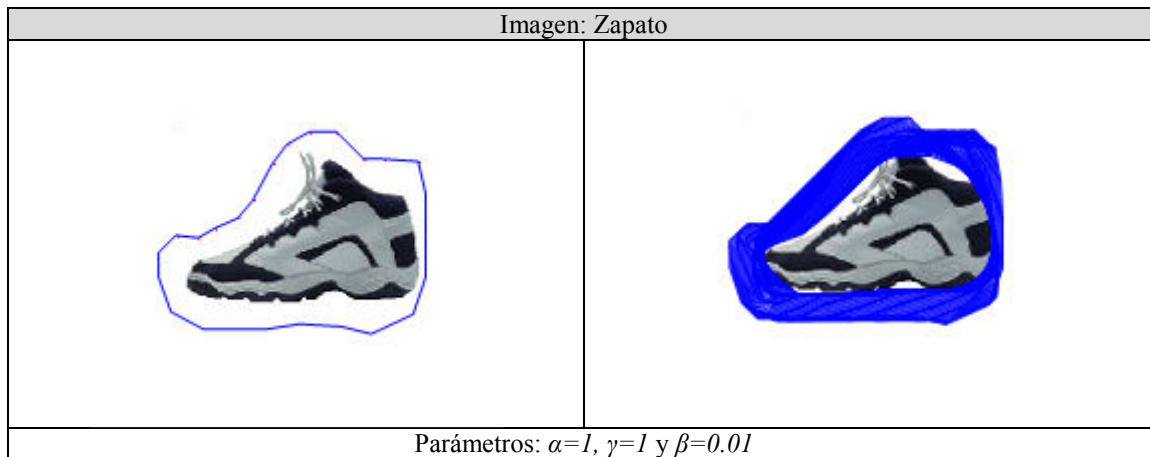


Parámetros: $\alpha=1.4$, $\gamma=1.8$ y $\beta=1$

Imagen: Medusas 2



Parámetros: $\alpha=1.4$, $\gamma=1.8$ y $\beta=1$



Las imágenes mostradas corresponden a la ejecución del programa credo pero ajustado al caso de una única imagen.

3.4. Snakes estéreo.

3.4.1. Introducción

Hasta el momento, el método de segmentación mediante contornos activos, se ha presentado para imágenes en 2D. Sin embargo, debido a que uno de los objetivos de este proyecto es el cálculo de la profundidad de un objeto en concreto, es necesario adaptar este método a imágenes en 3D.

La idea de mezclar la información obtenida en las imágenes estéreo con los contornos activos, ha sido explorada con antelación. El siguiente subapartado, *Estado del Arte*, muestra algunos de los artículos publicados relacionados con esta idea. Así mismo, en el subapartado *Método Propuesto*, se explica el método que se ha desarrollado en la ejecución de este proyecto.

3.4.2. Estado del Arte

En la última década se han realizado investigaciones y publicado artículos sobre segmentación de objetos en imágenes estéreo empleando la técnica de contornos activos. A continuación se comentan los principales artículos publicados, así como ventajas o desventajas que hubiera proporcionado la implantación de dicho artículo en este proyecto.

En el 2000, Ntalianis, K.S. y colaboradores, en [3.1] crearon un algoritmo mediante el cual se obtenía de forma automática el contorno inicial de la Snake, a partir de un mapa de profundidad obtenido mediante el algoritmo de multirresolución RSST (Recursive Shortest Spanning Tree). El algoritmo creado consiste en lo siguiente:

Conocida la posición z del objeto de interés, el algoritmo devuelve una imagen con tres colores:

- Blanco: si lo analizado corresponde a una profundidad distinta de la de estudio.
- Gris: Si lo analizado corresponde a una profundidad cercana a la de estudio.
- Negro: Si lo analizado corresponde a la profundidad de estudio.

El contorno inicial lo forman los puntos que pertenezcan a un borde y esté más cercanos a la frontera entre la parte gris y blanca de la imagen anterior.

Pese a que supone una gran ventaja la obtención del contorno inicial de la Snake de forma automática, existen dos razones por las que este algoritmo no es de utilidad en este proyecto:

- La profundidad del objeto de interés es desconocida, de hecho, es uno de los puntos a determinar.
- Este algoritmo está pensado para situaciones en las que el objeto de interés se encuentra en la misma posición z , sin embargo, el objeto de interés de este proyecto consiste en un chorro de agua cuya profundidad es variable.

En el 2002, Jacob, M., Blu T. y Unser, M. en [3.2] crearon un algoritmo basado en estos conceptos con el fin de determinar el modelo en 3D de un filamento de ADN. El fundamento de este algoritmo se basa en que el filamento de ADN se puede representar mediante una función B-Spline, cuyos parámetros son el objeto de estudio. El algoritmo creado consiste en lo siguiente:

- La primera parte consiste en obtener una imagen en la que se elimine el ruido producido en la captación de las imágenes y únicamente quede el filamento. Esto se consigue mediante la utilización de filtros adaptados con distintas orientaciones.
- A la imagen obtenida en el paso anterior, se le aplica la segmentación mediante contornos activos. El contorno inicial se obtiene de forma manual, introducido por el usuario.
- Una vez que conocemos los puntos de la curva que forma el filamento (resultado final de la Snake), se calculan los parámetros de la curva B-Spline en 2D cuyo valor mejor se ajuste al área determinada por la Snake.
- Una vez conocidos los parámetros de la curva B-Spline en 2D, se puede obtener de forma fácil su representación en 3D.

Este algoritmo proporciona una idea muy interesante que se podría haber desarrollado en este proyecto, obtener los parámetros de parábola que mejor se ajusten al objeto de interés, y de esta forma, una vez conocida la función de la parábola, se podría determinar la posición de z en cada instante de tiempo.

Sin embargo, presenta las siguientes desventajas para el proyecto creado:

- El contorno inicial de la Snake se obtiene de forma manual, mientras que el objetivo de este proyecto es que no se necesite intervención del usuario en ningún paso del programa.
- Sigue siendo necesario conocer los parámetros de la cámara para obtener la representación en 3D a partir de la segmentación realizada en 2D

En el 2004, Gelautz, M. y Markovic, D. en [3.3] crearon el siguiente algoritmo:

- A partir de la imagen de bordes del mapa de disparidad de dos imágenes estéreo y de la imagen bordes de la imagen de la izquierda, se obtiene una imagen resultante de una función de combinación entre ambas.
- La Snake se implementará sobre la imagen resultante del paso anterior.

Este algoritmo presenta buenos resultados frente a un gran problema de la Snake, ya que bordes cercanos al objeto de interés afectan a la posición final de la Snake al hacer converger a la Snake en dichos puntos. Sin embargo, presenta los siguientes inconvenientes que afectan a este proyecto:

- El contorno inicial de la Snake se obtiene de forma manual, mientras que el objetivo de este proyecto es que no se necesite intervención del usuario en ningún paso del programa.
- El algoritmo creado es óptimo para objetos de interés cuyo desplazamiento entre las imágenes estéreo sea mínimo, es decir, objetos alejados de las cámaras, ya que su funcionamiento frente a objetos con gran desplazamiento entre las imágenes estéreo (objetos cercanos a las cámaras) no queda demostrado.

En el 2005, Shin-Hyoung Kim y John Whan Jang, en [3.4] crearon un algoritmo basado en la modificación de la función de energía de la Snake, con el fin de adaptarlo a las imágenes estéreo. Para ello, realizan lo siguiente:

- El primer paso consiste en el cálculo del mapa de disparidad.
- Se calcula la Snake de la imagen izquierda a partir de una función de energía modificada. La modificación de la función se basa en que la energía exterior consiste en el gradiente del mapa de disparidad.
- Una vez obtenido el mapa de disparidad y la Snake final de la imagen izquierda, se pueden obtener la Snake correspondiente en la imagen derecha.

La idea de modificar la función de energía de la Snake para adaptarlo al caso de 3D, ha sido empleada en el proyecto creado, aunque la modificación realizada no coincide con la propuesta en este algoritmo.

En el 2006, Charmi, M.A., Derrode, S. y Ghorbel, F. en [3.5] crearon un algoritmo para obtener de forma automática el contorno inicial de la imagen derecha a partir de la Snake final de la imagen izquierda. El algoritmo consiste en lo siguiente:

- Se aplica la segmentación mediante contornos activos en la imagen de la izquierda.
- A partir de la Snake final, se calculan 4 puntos, el que se encuentra más a la izquierda, el de más a la derecha, el de más arriba y el de más abajo (Aleft, Aright, Aup, Adown). De esta forma, se obtiene un rectángulo que englobe el objeto de interés y que pase por estos puntos seleccionados.
- Debido a que las imágenes estéreo se encuentran rectificadas, las partes del rectángulo que englobe al objeto de interés de la imagen derecha, pasarán por los puntos A right y Adown.
- Para calcular los lados laterales del rectángulo en la imagen derecha, a partir de los puntos Aleft y Aright, se calcula cuál es su correspondiente mediante técnicas de correlación a través de una ventana deslizante. Los laterales del rectángulo pasarán por esos nuevos puntos calculados.
- Finalmente, una vez obtenido el rectángulo que engloba el objeto de interés de la imagen derecha, corresponde con el área inicial de la Snake de la imagen derecha.

El algoritmo creado presenta resultados de forma muy rápida, ya que únicamente se calcula la correspondencia entre las imágenes para dos puntos. Sin embargo, existen inconvenientes para que no se haya empleado este algoritmo en el proyecto:

- El contorno inicial de la Snake de la imagen izquierda se obtiene de forma manual, mientras que el objetivo de este proyecto es que no se necesite intervención del usuario en ningún paso del programa.
- No existe correspondencia entre los puntos obtenidos de la Snake final de la imagen izquierda con los de la derecha, por lo que no podríamos conocer la profundidad del objeto de interés.

3.4.3. Método propuesto

Como se ha comentado en el apartado anterior, se ha empleado la idea propuesta en Shin-Hyoung Kim y John Whan Jang en [3.4] de modificar la función de energía de la Snake en 2D para adaptarla al caso en 3D. En concreto, la modificación propuesta consiste en usar la información obtenida mediante el mapa de disparidad para el cálculo de la deformación de la Snake.

Una Snake 3D es un contorno paramétrico $v(s,t)=[x(s,t),y(s,t), z(s,t)]^t$, variable en el tiempo y definido en la superficie $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$, donde las coordenadas $x(s,t)$, $y(s,t)$ y $z(s,t)$ del contorno son funciones de la variable paramétrica $s \in [0,1]$, y del tiempo t .

El objetivo de la Snake en 3D es moverse alrededor de la superficie con el fin de minimizar su función de energía

$$E_{total} = \int_0^1 E(v(s))ds = \int_0^1 (E_{int}(v(s)) + E_{ext}(v(s)))ds \quad (Ec.3.11)$$

El método propuesto para deformar la Snake en 3D alrededor de la superficie a segmentar consiste en lo siguiente:

- Dado un nodo de la Snake 2D de la imagen izquierda ($p_{0,0}$) y su entorno 3x3

$$\begin{bmatrix} p_{-1,-1} & p_{0,-1} & p_{1,-1} \\ p_{-1,0} & p_{0,0} & p_{1,0} \\ p_{-1,1} & p_{0,1} & p_{1,1} \end{bmatrix} \quad (Ec.3.12)$$

- Se calcula la función de energía en el entorno 3x3 alrededor del nodo.

$$E_{izq} = \begin{bmatrix} Ep_{-1,-1} & Ep_{0,-1} & Ep_{1,-1} \\ Ep_{-1,0} & Ep_{0,0} & Ep_{1,0} \\ Ep_{-1,1} & Ep_{0,1} & Ep_{1,1} \end{bmatrix} \quad (Ec.3.13)$$

- Para cada punto del entorno 3x3, se calculará cuál es su correspondiente en la imagen derecha, usando para ello la información obtenida mediante el cálculo del mapa de disparidad. Los puntos correspondientes en la imagen derecha del entorno 3x3 alrededor del nodo de la Snake en 2d de la imagen izquierda, formarán el vector de correspondencia.

$$\begin{bmatrix} p_{-1,-1} \\ p_{0,-1} \\ p_{1,-1} \\ p_{-1,0} \\ p_{0,0} \\ p_{1,0} \\ p_{-1,1} \\ p_{0,1} \\ p_{1,1} \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \\ p_9 \end{bmatrix} \quad (Ec.3.14)$$

- Se calculará la energía de cada elemento del vector de correspondencia

$$E_{der} = \begin{bmatrix} Ep_1 & Ep_2 & Ep_3 \\ Ep_4 & Ep_5 & Ep_6 \\ Ep_7 & Ep_8 & Ep_9 \end{bmatrix} \quad (Ec.3.15)$$

- Se suman las componentes de energía de la imagen izquierda con la obtenida con la imagen derecha

$$E_{Snake\ 3D} = E_{izq} + E_{der} \quad (Ec.3.16)$$

- El elemento que posea la menor energía, será la nueva posición del nodo de la Snake