

Algoritmo de segmentación MLC para Radioterapia de Intensidad Modulada

Miguel A. Nasarre, Juan M. Artacho, Diego Sánchez, Emiliano Bernués.

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Instituto de Investigación de Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza

Email de contacto : jartacho@posta.unizar.es

Abstract- In the treatment of cancer with IMRT system (Intensity Modulated Radiotherapy), the delivery of intensity with a multi-leaf-collimator (MLC) needs a sequence of apertures or segments, which decide the movements of the leaves. In the static MLC technique, MLC leaves stay stationary during the irradiation, so the dose delivery is very precise. The negative aspect is that there is a relative long verification and recording overhead time per segment. Thus, the number of required apertures strongly determines the duration of the treatment. The purpose of this paper is to develop an algorithm that decides a sequence of apertures that reduce the number of segments to deliver the dose. The developed algorithm has been applied in several prostate cases.

I. INTRODUCCIÓN

La Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) es una técnica aplicada al tratamiento del cáncer, que utiliza haces de rayos-X de alta potencia, situados en diferentes posiciones espaciales. La intensidad radiada por cada haz queda descrita mediante un patrón de intensidades que se representa por una matriz de fluencia, de modo que cada elemento de la matriz (peso) representa la cantidad de radiación que debe pasar en una determinada dirección del espacio.

El cálculo de los patrones de intensidad ó matriz de fluencia asociada a cada foco, se efectúa en base a la dosis prescrita por el especialista, y su resolución exige el planteamiento de un problema inverso [1] [2].

Una vez obtenida la intensidad que aporta cada haz en cada una de las direcciones espaciales del mismo, una técnica utilizada para aplicar la dosis al paciente es la tecnología MLC (“computer-controlled MultiLeaf Collimator”). El sistema MLC consiste en un conjunto de láminas de tungsteno formando pares contrapuestos, que atenúan los rayos-X. Estas láminas son desplazadas longitudinalmente por pequeños motores eléctricos, al objeto de formar diferentes aperturas (ó máscaras) que dejen pasar el haz por el hueco creado, lo que permite dar forma al haz de radiación (Figura 1).

El proceso de distribución de la matriz de dosis calculada para cada haz, se realiza en una secuencia de etapas. De modo que para cada etapa es preciso hallar la forma de la máscara y la cantidad de dosis que se libera. Este trabajo se centra en el análisis de la técnica MLC estática, en donde el foco de radiación se apaga al mover las láminas entre sucesivas etapas. Por ello, teniendo en cuenta que el sistema MLC requiere un tiempo considerable para realizar el movimiento de las láminas entre las diferentes etapas, resulta

muy interesante el estudio de métodos que permitan la distribución de la dosis en el menor número de segmentos o etapas. Por otra parte, ya que la intensidad de dosis mínima aplicable es la Unidad de Monitor (UM), el error de redondeo sobre una determinada cantidad de dosis se hace más significativo cuanto menor sea la radiación liberada. Lo que hace que por lo general el error relativo aumente al aumentar el número de segmentos, ya que cuanto mayor sea el número de segmentos, menor será la dosis media.

A continuación estudiaremos el proceso de segmentación multiláminas, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales es el de reducir el número de etapas y con ello el tiempo de la sesión de tratamiento sobre el paciente.

II. SEGMENTACIÓN MLC

Desde un punto de vista matemático, el problema consiste en encontrar un conjunto de máscaras M_k y umbrales d_k que cumplan:

$$P(i, j) = \sum_{k=1}^N d_k M_k(i, j) \quad (1)$$

donde $P(i, j)$ es una matriz de pesos de tamaño $m \times n$ que representa el patrón de intensidades de un haz determinado, y donde N es el número de etapas o segmentos de la descomposición. De modo que cada etapa queda determinada por una máscara y un umbral.

La máscara en la etapa k queda representada por una matriz $M_k(i, j)$ de las mismas dimensiones que la matriz de pesos, que establece la forma de la apertura.

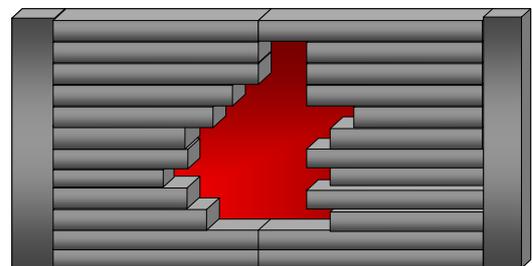


Figura 1. Apertura de láminas del sistema MLC.

Cuyos elementos son cero o uno, de modo que un “1” indica que en esa localización hay apertura y por lo tanto se produce radiación en esa dirección. Mientras que si el elemento es “0”, la lámina de tungsteno impide el paso de la radiación.

El umbral d_k asociado a la etapa k , es un escalar que representa la cantidad de radiación que se debe aplicar en esa

etapa, valor que a su vez está relacionado con el tiempo de exposición de los Rayos X, en función de la energía del haz.

Nos referiremos al área A_k de una máscara M_k , como el número de unos de dicha máscara, que puede expresarse matemáticamente mediante

$$A_k = [1 \ \dots \ 1] \cdot M_k \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La dosis que se aplica en una etapa, queda determinada por el producto del umbral d_k seleccionado por el área A_k de la máscara.

Si denominamos P_1 a la matriz de pesos P original, o matriz de fluencia y P_{k+1} a la matriz de pesos residual una vez aplicada la primeras k etapas, se tiene que:

$$\begin{aligned} P_1(i, j) &= P(i, j) \\ P_2(i, j) &= P_1(i, j) - d_1 M_1(i, j) \\ &\vdots \\ P_{k+1}(i, j) &= P_k(i, j) - d_k M_k(i, j) \\ &\vdots \\ P_{N+1}(i, j) &= P_N(i, j) - d_N M_N(i, j) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Resultando que la matriz residual P_{N+1} una vez aplicadas todas las etapas (N etapas) tendrá todos sus elementos nulos, por lo que el proceso concluye cuando se ha distribuido completamente la dosis.

III. ALGORITMO DE SEGMENTACIÓN

El propósito de un algoritmo de segmentación MLC es decidir una secuencia de máscaras y umbrales que cumplan la ecuación (1). La decisión del valor del umbral que se aplica en cada etapa es fundamental para obtener un buen algoritmo de segmentación. El umbral de una etapa debe ser un escalar positivo, cuyo valor debe estar comprendido entre cero y el máximo valor de la matriz de pesos residual. Una vez fijado el umbral, se establece la máscara asociada, marcando con "1", aquellas localizaciones de la matriz de pesos cuyos elementos igualen o superen el valor del umbral. Algunos métodos establecen de forma determinista el umbral de cada etapa, seleccionando la máscara en base a este umbral [3].

En este trabajo, al objeto de obtener una rápida distribución de la dosis, como punto de partida se establece el criterio de decisión de escoger aquellas máscaras y umbrales que maximicen el producto de A_k con d_k . Aunque, como se analiza más adelante, esta pauta no siempre es la más adecuada para minimizar el número de etapas N . Ya que, frecuentemente, distribuir la máxima dosis de una matriz de pesos da como resultado una matriz residual más compleja que su antecesora.

Podemos decir que una matriz de pesos es tanto más compleja cuantas más etapas requiere su completa distribución, sin embargo el número de etapas depende del método que se aplique, obteniendo para un mismo caso, diferentes resultados para la fragmentación, y no existe un método general que garantice que se alcanza el mínimo número de etapas [4].

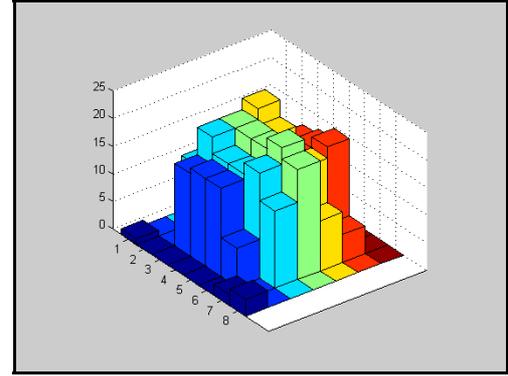


Figura 2. Representación gráfica de una matriz de pesos.

Ya que la complejidad de segmentación de una matriz depende fundamentalmente de la complejidad de segmentación de cada una de sus filas, tal como puede deducirse del análisis de la figura 2, en la que se representa la matriz de pesos de un haz dado para un cáncer de próstata.

Una forma de reducir la complejidad de una matriz de pesos es realizar el tratamiento sobre las filas que componen dicha matriz. A continuación, se estudian dos nuevos criterios para la selección de máscaras al objeto de conseguir reducir la complejidad de las matrices de dosis residuales y con ello reducir el número de etapas necesarias para la segmentación.

Estos criterios son evitar la formación de nuevos máximos locales y favorecer la formación de alisamientos en los valores de los elementos de las filas.

1. FORMACIÓN DE MÁXIMOS

Como paso previo, estableceremos que hay un máximo local dentro de una fila cuando aparezca un elemento (ó agrupación de elementos consecutivos del mismo valor), cuyos elementos adyacentes adquieran un valor inferior a él. Para comprender su influencia, consideraremos un ejemplo en el que tengamos tres filas de una matriz como las mostradas en la figura 3.

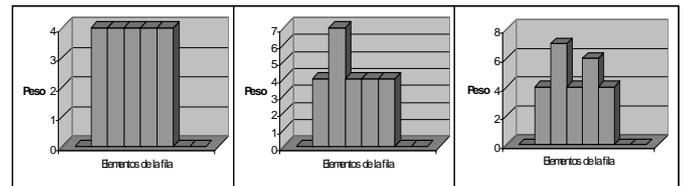


Figura 3. a) ausencia de máximos locales, b) con un máximo local, c) con dos máximos locales.

En el primer caso (a), no aparece ningún máximo local salvo el máximo central, resultando que para segmentar esa fila sólo se precisa una etapa con umbral de valor cuatro. En el segundo caso (b), aparece un máximo local sobre el nivel, con lo que la fila necesitará al menos dos etapas para ser segmentada. Por último, en el tercer caso (c), que presenta dos máximos, es preciso invertir al menos tres etapas para distribuir la dosis.

El número de máximos locales que aparecen en una fila, condiciona el número de etapas empleadas en la segmentación de esta fila, por lo que resulta aconsejable que

para un umbral determinado, la máscara seleccionada no genere nuevos máximos.

2. FORMACIÓN DE ALISAMIENTOS

En este apartado, se analiza cómo reducir la complejidad de las matrices residuales, mediante la igualación de los niveles de aquellos elementos que se encuentren separados (o no) por elementos de mayor valor, suceso al que nos referiremos como *alisamiento*.

Consideremos un ejemplo en el que la fila P_i , perteneciente a una matriz P , adquiera el valor $P_i=[4\ 5\ 7\ 3\ 6\ 4\ 0\ 0]$, que presenta dos máximos locales. Supongamos que el umbral elegido para la etapa k , sea de valor igual a tres ($d_k=3$). Al considerar la máscara de mayor área posible, obtendríamos $M_{1i}=[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0]$, con lo que la fila asociada a la matriz residual quedará $P_{2i}=[1\ 2\ 4\ 0\ 3\ 1\ 0\ 0]$, que contiene dos máximos locales, manteniendo por tanto el número de máximos. Esta fila residual P_{2i} precisa al menos cinco etapas para completar su segmentación. Sin embargo, si en la etapa anterior se decide no aplicar el umbral al primer y segundo elementos de la fila, resulta la máscara siguiente: $M_{1i}=[0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0]$, quedando la fila residual $P_{2i}=[4\ 5\ 4\ 0\ 3\ 1\ 0\ 0]$, que puede segmentarse en cuatro etapas, como consecuencia de haber obtenido un alisamiento entre el primer y el tercer elemento. De modo que la formación de alisamientos favorece la reducción del número de etapas necesarias para la segmentación.

IV. PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO

En base a las consideraciones anteriores, se ha procedido a la programación de un nuevo algoritmo de segmentación de etapas para el sistema MLC, que consta de las opciones que aparecen reflejadas en la Tabla 1.

	Evitar máximos	Favorecer alisamientos
Opción 1	Sí	Sí
Opción 2	No	No
Opción 3	Sí	No
Opción 4	No	Sí

Tabla 1. Opciones del algoritmo de segmentación.

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

a) Ensayaremos con todos los umbrales posibles, desde el elemento de mínimo valor de la matriz de pesos hasta el de valor máximo.

b) Para cada uno de los umbrales, se hallan todas las posibles máscaras de cada fila. Una fila tendrá tantas máscaras posibles como agrupaciones de elementos que superen el umbral.

c) Guardaremos el conjunto de máscaras anterior en una *hipermatriz* ó una matriz cúbica de dimensiones $m \times n \times q$, a partir del cual formaremos un conjunto de máscaras candidatas, al considerar las diferentes combinaciones entre las filas de la hipermatriz.

Con esta finalidad, se propone realizar una codificación en una variable η , que recorra valores desde 0 hasta $(q^m - 1)$, donde q indica la dimensión de profundidad de la hipermatriz, y m representa su número de filas.

Así por ejemplo, al codificar $\eta = 3$, en base $q = 2$ y con $m = 4$, se obtendría como resultado 0011, cuyo valor indicaría que ha de considerarse la máscara, escogiendo las filas 1 y 2 de la primera matriz que constituye la hipermatriz y las filas 3 y 4 de la segunda hipermatriz.

Sobre estas máscaras, en su caso, se impondrá la condición de ser físicamente realizables, dependiendo del sistema MLC utilizado, ya que hay sistemas comerciales que no permiten la colisión entre láminas de dos filas consecutivas.

Un esquema más general se muestra en la figura 4, al considerar una matriz de pesos

$$P_k = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 3 & 0 \\ 1 & 3 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

y al elegir un umbral de valor $d_k = 3$. En esta figura se muestran las diferentes combinaciones o candidatas a máscara que resultan del proceso de codificación anterior.

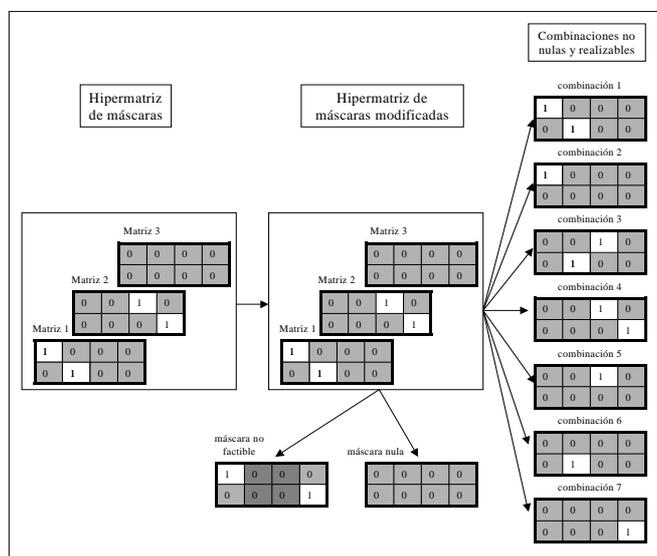


Figura 4. Formación del conjunto de candidatas a máscaras.

d) Entre todos los pares máscara-umbral, se elige el que proporcione el máximo valor del producto entre umbral y *área* de la máscara. Y a igualdad de producto el que más elementos enteros anule, y en su caso si se mantiene la igualdad, aquel cuyo valor de umbral sea mayor, para conseguir que el error de redondeo sea menos significativo. Operando de esta forma conseguimos una distribución rápida de la matriz de pesos.

Ahora podemos optar por elegir en cada etapa, aquel par máscara-umbral, que conduzca a una matriz residual de menor complejidad, según los criterios descritos en el apartado anterior en cuanto a favorecer alisamientos y evitar aparición de nuevos máximos. Con lo que se consigue reducir el número de etapas de la segmentación. Si el mínimo número de etapas es alcanzado por más de un par, entonces seleccionaremos aquel cuyo producto entre umbral y *área* de la máscara sea máximo.

El algoritmo presentado tiene la ventaja de poder convertirse en un algoritmo recursivo. De forma que se puede invocar a sí mismo para calcular el número de etapas que resultaría como consecuencia de aplicar un par máscara-umbral. Para ello, se ha generado una función que calcula la

complejidad de la matriz residual, y que a su vez se puede llamar a sí misma tantas veces como se quiera. No obstante, ya que la recursividad puede traducirse en un tiempo de ejecución considerable, debido al enorme número de combinaciones que pueden darse en cada subproceso, impondremos un límite máximo para el número de niveles utilizados en la recursividad.

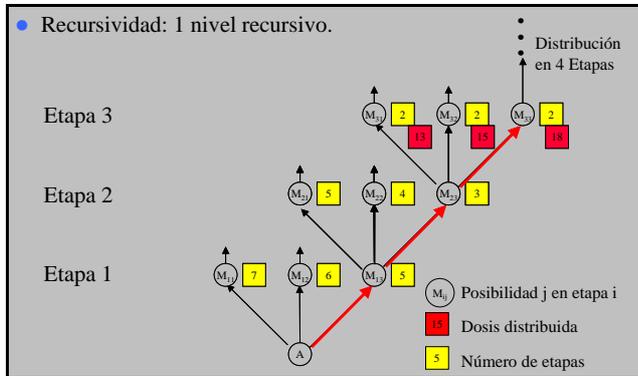


Figura 5. Diagrama con un nivel recursivo.

e) Una vez seleccionado el par máscara-umbral y calculada la matriz residual, repetimos el proceso tantas veces como sea necesario hasta conseguir que todos los elementos de la matriz residual sean nulos.

V. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos con el algoritmo de segmentación propuesto, para diferentes tratamientos de un cáncer de próstata al utilizar cinco haces de radiación. Las gráficas presentan los resultados globales de la segmentación de las cinco matrices de pesos correspondientes a cada uno de los focos. El eje de ordenadas indica el número de etapas empleadas, y el de abscisas representa un coeficiente que indica la prioridad que se le da en el tratamiento al tumor respecto a otros órganos de riesgo.

A. Modificación de máscaras

En la figura 6 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos en función de las técnicas de modificación de máscaras descritas en la tabla I.

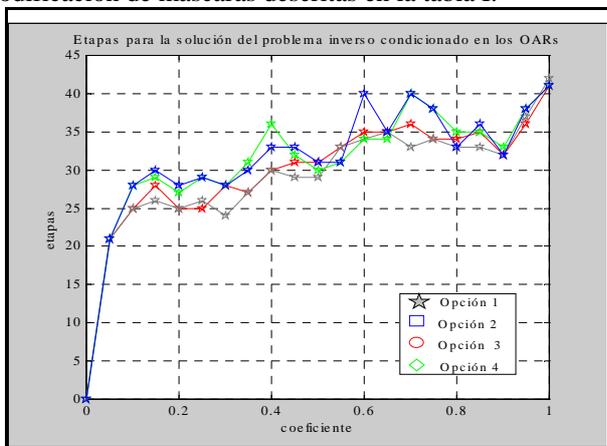


Figura 6. Número de etapas según la opción elegida.

De su análisis se desprende, que en general la opción 1 es la que alcanza el mejor resultado en casi todos los casos analizados. Con ello queda comprobado que renunciar a

distribuir la máxima dosis posible puede llegar a proporcionar una reducción en la complejidad de la matriz residual y como consecuencia una disminución del número de etapas de la segmentación.

B. Utilización del nivel recursivo

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos al considerar un nivel recursivo en el algoritmo de segmentación en el caso de un tumor de próstata.

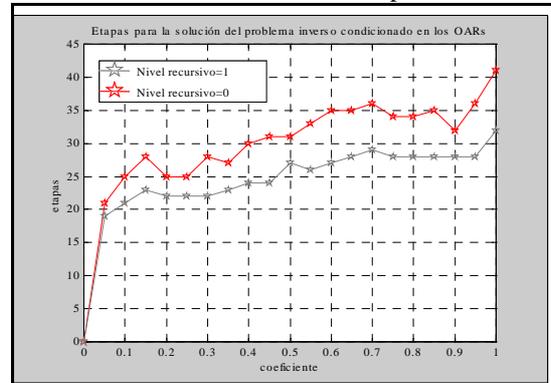


Figura 7. Número de etapas en función del nivel recursivo

Como se deduce de los resultados de la gráfica de la figura 7, para todos los casos considerados, el número de etapas se reduce significativamente al utilizar un nivel recursivo. El número medio de etapas en este caso es 25, mientras que si no se emplea recursividad se sitúa en 31. Lo que supone una reducción del 18'17 % en el número de etapas, aunque ello aumenta notablemente el tiempo de ejecución de los algoritmos.

VI. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un nuevo algoritmo que permite la segmentación MLC de las matrices de pesos del sistema IMRT. Este algoritmo se ha aplicado al tratamiento del cáncer de próstata, obteniendo unos resultados que permiten reducir el número de etapas de la segmentación con respecto a otros métodos utilizados. El criterio utilizado ha sido el de máxima distribución de dosis, pero modificando las máscaras de forma que se evite la formación de nuevos máximos en las matrices residuales y favoreciendo la creación de alisamientos. El algoritmo implementado permite la recursividad, lo que permite reducir aún más el número de etapas, pero aumentando notablemente el tiempo de ejecución.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la financiación de la empresa Técnicas Radio físicas S.L..

VIII. REFERENCIAS

- [1] M. Aznar, E. Bernués, J. M. Artacho, "Optimización de un sistema de radioterapia por modulación de la intensidad", URSI 2003, S4-A2.3-P6.
- [2] Q. Wu, R. Mohan, "Algorithms and functionality of an intensity modulated radiotherapy optimization system", Med. Phys., 27, 701-711, 2000.
- [3] P. Xia, L. J. Verhey, "Multileaf collimator leaf sequencing algorithm for intensity modulated beams with multiple static segments", Med. Phys. 25 1424-1434 (1998).

- [4] J. Dai, Y. Zhu, "Minimizing the number of segments in a delivery sequence for intensity-modulated radiation therapy with a multileaf collimator", *Med. Phys.* 28 2113-2120 (2001).