

PLACEMENT OPTIMAL D'OBJETS DÉFORMABLES DANS L'ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION ANALOGIQUE CAIRO+

Pierre NGUYEN TUONG Marie-Minerve LOUËRAT
Alain GREINER

Département ASIM, laboratoire LIP6, Université Pierre et Marie CURIE
4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05
Pierre.Nguyen-Tuong@lip6.fr

RÉSUMÉ :

Les composants élémentaires d'un circuit analogique obtenu par génération procédurale peuvent occuper des surfaces extrêmement variables entre deux réalisations correspondant à des spécifications fonctionnelles différentes. Il en va de même si l'on considère une même spécification fonctionnelle réalisée en prenant pour cible deux procédés de fabrication différents. Heureusement ces composants élémentaires (transistors, capacités, résistances, etc.), sont généralement des objets "mous" et déformables. En effet, pour des caractéristiques électriques données et pour un procédé de fabrication particulier la surface est approximativement constante, mais le rapport hauteur/largeur est variable. On présente une méthode générale de placement optimal d'un ensemble d'objets rectangulaires déformables et de tailles variables. Cette méthode est complètement hiérarchique. Elle s'appuie sur une technique de placement relatif "en tranches" et sur la définition d'une abstraction appelée "fonction de forme" pour laquelle on définit les opérations de composition et de réduction.

I – INTRODUCTION

La réutilisation de composants analogiques pour la conception des systèmes intégrés reste un problème ouvert. Le concept de bibliothèque de cellules précaractérisées n'existe pas en analogique puisque les composants élémentaires (transistors, capacités, résistances, etc.) d'un module analogique sont électriquement dimensionnés suivant le contexte d'utilisation de ce module. Dans le domaine analogique, la réutilisation passe donc par le développement de générateurs capables d'accepter différentes spécifications fonctionnelles pour différents procédés de fabrication. Le projet CAIRO+ vise le développement d'un langage et d'un environnement de conception permettant de concevoir de tels générateurs [1] [2] [3].

Une fonction analogique est décrite comme un module générique qui possède un schéma de principe figé mais non dimensionné. A chaque exécution du programme générateur tous les composants élémentaires doivent être redimensionnés pour satisfaire une spécification fonctionnelle particulière, ou pour s'adapter à un nouveau procédé de fabrication. Par conséquent la surface occupée par ces composants élémentaires est extrêmement variable : la surface d'une capacité ou d'un transistor peut varier avec un facteur dix suivant la spécification fonctionnelle ou le choix du procédé de fabrication. De plus, les surfaces des différents composants peuvent varier dans des sens contraires, l'une diminuer tandis que l'autre augmente. Enfin, l'approche proposée par CAIRO+ est totalement hiérarchique puisqu'un module peut être instancié par un module de niveau supérieur.

Heureusement on dispose d'un degré de liberté, car les composants élémentaires sont généralement des objets déformables : pour un procédé de fabrication donné, et pour une valeur électrique imposée, une capacité occupe une surface à peu près constante, mais le rapport hauteur/largeur n'est pas fixé. De même les transistors analogiques sont souvent repliés et possèdent une structure "en peigne" pour minimiser les capacités parasites de drain. Pour des caractéristiques électriques données (longueur et largeur du canal), la surface est approximativement constante, mais on peut faire varier la forme en faisant varier le nombre de dents du peigne...

On est donc confronté à un problème de placement hiérarchique d'objets déformables, sachant que la déformation est contrôlée : pour un procédé de fabrication particulier et pour une spécification électrique imposée

chaque composant élémentaire peut être caractérisé par une *fonction de forme* qui définit l'ensemble des réalisations matérielles possibles pour ce composant.

II – PLACEMENT RELATIF

Le problème du placement consiste donc à choisir pour chaque composant instancié un point particulier de la fonction de forme, et à réaliser le placement relatif des composants les uns par rapport aux autres. Pour que ce problème soit soluble on impose des contraintes topologiques : de même qu'un module doit respecter un schéma d'interconnexions de principe figé (on parle de *netlist template*), il doit respecter une structure topologique physique imposée (on parle de *layout template*).

Le plan de masse d'un circuit doit être organisé comme une hiérarchie de *conteneurs* alternativement horizontaux et verticaux. Un *conteneur* est un aboutement (vertical ou horizontal) de composants élémentaires (ou d'autres conteneurs). En pratique un conteneur ne contient pas de conteneurs de même type que lui-même : on a donc une alternance de conteneurs verticaux et horizontaux. La figure 1 présente les deux types de conteneurs, un exemple de partitionnement spatial et l'arbre des conteneurs associé.

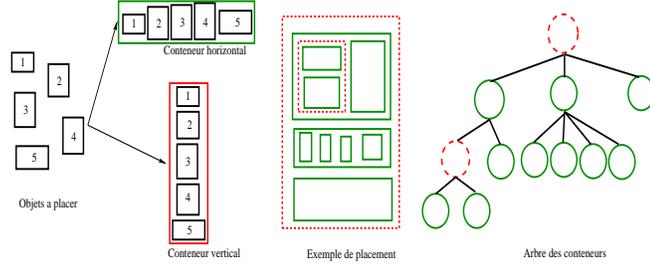


FIG. 1 – Conteneurs

III – FONCTION DE FORME

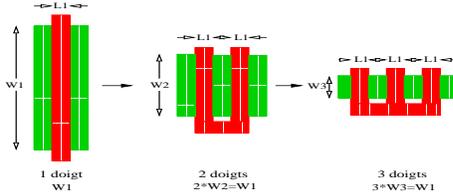


FIG. 2 – Repléments d'un transistor

La figure 2 donne un exemple de transistor replié (transistor "en peigne"). La largeur et la longueur du *layout* ne peuvent varier que par paliers, chaque palier correspondant ici à un changement du nombre de dents du peigne, ce qui permet de définir la *fonction de forme* qui est donc une fonction constante par morceaux caractéristique d'un composant élémentaire.

Soient DY la hauteur d'un composant élémentaire et DX sa largeur. CAIRO+ mettant en oeuvre une approche de dessin symbolique sur grille fixe, ces deux dimensions ont des valeurs entières : $DY \in \mathbb{N}^{*+}$ et $DX \in \mathbb{N}^{*+}$.

On appelle fonction de forme suivant DY , notée FF_{DY} , la fonction telle que

$$FF_{DY} : \begin{cases} \text{il existe une suite } DY_0 < DY_1 < \dots < DY_n < \dots < +\infty \\ f \text{ est constante sur } [DY_i, DY_{i+1}[\end{cases} \quad (1)$$

c'est à dire

$$\forall DY \in [DY_i, DY_{i+1}[\xrightarrow{FF_{DY}(DY)} DX_i \quad (2)$$

A chaque valeur $DY \in [DY_i, DY_{i+1}[$ correspond donc une seule valeur DX_i . Cela revient à définir la largeur DX du composant sous une contrainte de hauteur DY . Pour une certaine plage de hauteur (l'intervalle $[DY_i, DY_{i+1}[$) la largeur obtenue est constante. On peut tracer le graphe de cette fonction (figure 3 à gauche). Il existe une borne minimum DY_0 en deçà de laquelle la fonction de forme n'est pas définie. Cette fonction de forme est monotone décroissante.

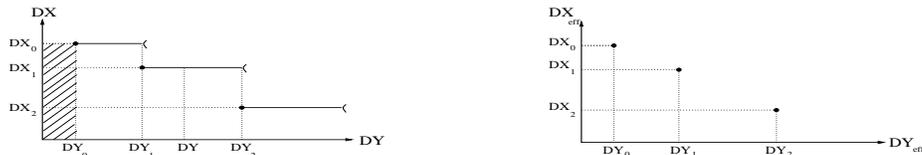


FIG. 3 – Fonction de forme suivant DY et fonction de forme réduite suivant DY

A partir de la fonction de forme suivant DY on peut définir une autre fonction DY_{eff} qui renvoie la valeur effective de la hauteur du composant lorsqu'il est soumis à une contrainte de hauteur DY . On a :

$$\forall DY \in [DY_i, DY_{i+1}[\xrightarrow{DY_{eff}(DY)} DY_i \quad (3)$$

On peut définir de même la fonction de forme suivant DX ; elle exprime la hauteur et la largeur d'un composant soumis à une contrainte de largeur. La représentation informatique de la fonction de forme peut être très compacte : il suffit de garder les points extrêmes de chaque intervalle. La fonction de forme réduite suivant DY (figure 3 à droite) est donc un ensemble de couples (DY_n, DX_n) . Elle est aussi monotone décroissante.

IV – COMPOSITION DES FONCTIONS DE FORME

Par définition, un conteneur est un rectangle qui contient d'autres rectangles aboutés entre eux. La composition des fonctions de forme consiste à calculer la fonction de forme d'un conteneur à partir des fonctions de forme des objets qu'il contient. Le point intéressant est que cette composition est unique. En appliquant cette procédure de composition récursivement sur l'arbre d'instanciation des conteneurs et en remontant des feuilles vers la racine, il est donc possible de calculer la fonction de forme du module racine. Rappelons que cette fonction de forme représente de façon synthétique **toutes** les réalisations possibles du module, lorsque les caractéristiques électriques de chacun des composants et le procédé de fabrication ont été définis. Nous décrivons ci-dessous la procédure de composition pour un conteneur horizontal (la procédure pour un conteneur vertical est identique).

Considérons un conteneur horizontal possédant n conteneurs fils (figure 4). On note $DY_{eff}(DY)$ (*resp.* $DX_{eff}(DY)$) la hauteur (*resp.* largeur) effective du conteneur horizontal lorsque l'on impose une contrainte sur DY , j l'index des fils du conteneur horizontal et $DY_{eff}^j(DY)$ (*resp.* $DX_{eff}^j(DY)$) i la hauteur (*resp.* largeur) effective du conteneur j lorsque l'on impose une contrainte sur DY .

$DY_{eff}(DY)$ est déterminée par la hauteur maximale des hauteurs effectives de chacun des n fils. La largeur totale $DX_{eff}(DY)$ du conteneur horizontal est égale à la somme des largeurs de chacun des fils pour chacune des hauteur effective, toujours en imposant une contrainte de hauteur globale :

$$DX_{eff}(DY) = \sum_j DX_{eff}^j(DY) \quad (4)$$

$$DY_{eff}(DY) = \max_j \{DY_{eff}^j(DY)\} \quad (5)$$

Les points DY_i, DX_i de la fonction de forme réduite du conteneur horizontal sont définis par :

$$DX_i = \sum_j DX_{eff}^j(DY_i) \quad (6)$$

$$DY_i = DY_{eff}(DY) \text{ lorsque } DY \in [DY_i, DY_{i+1}[\quad (7)$$

Les deux opérateurs *somme* et *max* étant associatifs, l'opération de composition est elle-même associative. On peut donc composer les fonctions de forme des conteneurs fils deux par deux. L'algorithme de composition parcourt les fonctions de forme réduites des fils, notées f_{fn} en ne retenant que les points pertinents répondant à la définition de la composition de fonctions de forme (équations 6 et 7). Considérons les deux fonctions de formes représentées à la figure 5.

- La première étape est la fusion des deux listes de points des fonctions de forme réduites afin d'obtenir une unique liste de points triés dans l'ordre croissant des hauteurs. (la provenance de chaque point est conservée, ce qui permet de retrouver la largeur associée). Cette liste est parcourue dans le sens croissant de ses valeurs.
- La première valeur trouvée est $DY_{eff_1}^1$; elle existe dans l'intervalle du device 1 mais pas dans l'intervalle du device 2. Elle est donc exclue.
- La deuxième valeur examinée est $DY_{eff_1}^2$. Pour une hauteur égale à $DY_{eff_1}^2$ nous avons deux valeurs $DY_{eff_1}^1$ et $DY_{eff_1}^2$ pour lesquelles il faut retenir la plus grande, c'est à dire $DY_{eff_1}^2$ (équation 7). La largeur est la somme des largeurs pour cette hauteur (équation 6) : $DX_1^1 + DX_1^2$.
- La hauteur suivante est $DY_{eff_2}^1$. Les points réels des deux fonctions de forme sont $DY_{eff_1}^2$ et $DY_{eff_2}^1$, dont la plus grande valeur est $DY_{eff_2}^1$. La largeur est $DX_2^1 + DX_1^2$.
- Le processus est ainsi répété jusqu'à épuisement des valeurs effectives.

V – RÉDUCTION DES FONCTIONS DE FORME

Les fonctions de forme d'une hiérarchie de conteneurs peuvent donc être calculées récursivement du bas vers le haut jusqu'à l'obtention de la fonction de forme du module racine. Ces fonctions de forme capturent toute l'information pertinente sur les différentes réalisations possible du module : si l'on impose une contrainte

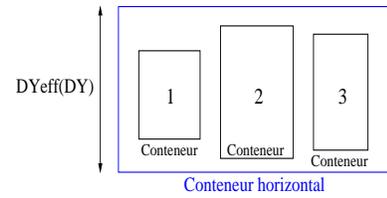


FIG. 4 – Aboutement horizontal

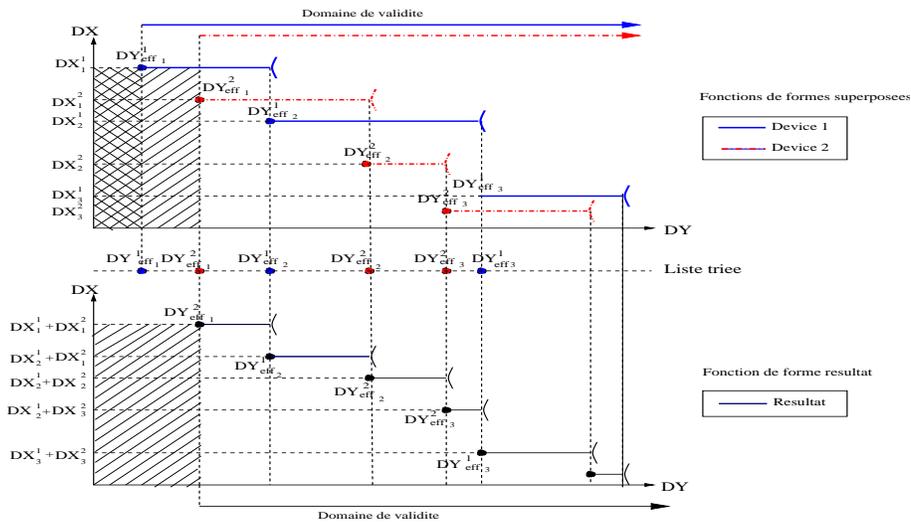


FIG. 5 – Composition de fonctions de forme pour un conteneur horizontal

particulière sur la hauteur ou sur la largeur du module racine, cette contrainte définit un unique point de la fonction de forme réduite du module racine. Mais choisir une forme particulière pour la racine impose une contrainte précise sur chacun des conteneurs fils dont la forme devient donc également définie de façon unique. Ces contraintes se propagent du haut vers le bas dans la hiérarchie des conteneurs jusqu'à imposer une forme unique et optimale pour chacun des composants élémentaires qui constituent les feuilles de l'arbre.

Cette propagation descendante est totalement déterministe et constitue le mécanisme de réduction qui aboutit à un placement optimal au sens où cet algorithme minimise la surface totale occupée par le module. Ce n'est qu'à ce moment-là qu'intervient la génération effective du *layout*.

Sur l'exemple de la figure 6 la contrainte de hauteur DX est appliquée au conteneur vertical racine CV_0 . Pour cette contrainte la valeur réalisable du conteneur déterminée à partir de la fonction de forme est (DX_{CV_0}, DY_{CV_0}) . Le conteneur fils de gauche est un conteneur horizontal, la contrainte de hauteur DY_{CV_0} lui est appliquée. Sa valeur réalisable est (DX_{CV_1}, DY_{CV_1}) . Le conteneur fils de gauche est un conteneur vertical, la contrainte de largeur DX_{CV_1} lui est appliquée...

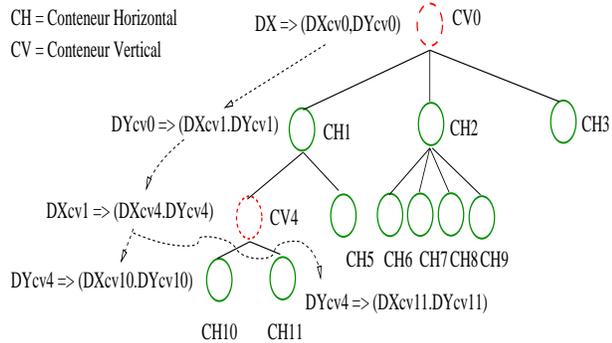


FIG. 6 – Réduction de fonction de forme

VI – CONCLUSION

Nous avons présenté une méthode exacte de placement optimisé de modules analogiques déformables. Cette méthode a été implantée dans l'environnement de conception CAIRO+ développé au LIP6 et constitue un des mécanismes de base qui permettent d'envisager de concevoir effectivement des générateurs de composants analogiques réutilisables pour différentes spécifications fonctionnelles et pour différents procédés de fabrication cible.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Dessouky, *Design for Reuse of Analog Circuits. Case Study :Very Low-Voltage Delta-Sigma Modulator*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, January 2001.
- [2] M. Dessouky and M.-M. Louërat, "A layout approach for electrical and physical design integration of high-performance analog circuits," pp. 291–298, ISQED, 2000.
- [3] V. Bourguet, M.-M. Louërat, and A. Greiner, "Composants analogiques déformables pour cairo+," GDR CAO, 2002.