

Brno, October 15, 2012

## **Review of the doctoral thesis submitted by Jan Bartovský entitled**

### **“Hardware Architectures for Morphological Filters with Large Structuring Elements”**

This review is based on the thesis submitted by Jan Bartovský to obtain the Doctor of Philosophy degree of the University Paris-Est with specialization Computer Sciences. The thesis focuses on morphological filters, more specifically on their implementation in dedicated hardware keeping in mind also applicability to the case of large structuring elements. The author’s objective was to provide a programmable and efficient implementation of basic morphological operators such as dilation or opening. The author considered both 1-D and 2-D cases. There is no doubt the topic is scientifically important and may significantly help in real-time applications.

The thesis is written in English and contains 157 pages divided into eight chapters (plus abstract, glossary, table of contents, publication list and bibliography). It contains both theoretical part and practical experiments. The overall impression while reading the thesis was very positive – it was a pleasure for me to read the text and learn about the advances in this area as the author has apparently very good English language knowledge, can adhere to good typesetting standards, and uses numerous figures, tables and schemes to demonstrate the principles and the behavior of the described methods and ideas. Just a few figures had wrong typesetting during final formatting but the author has sent me a corrected version.

The first three chapters of the thesis describe general context, basic terms and state-of-the-art algorithms for 1-D and 2-D dilation and opening. The algorithms are compared to each other with respect to the number of operations per pixel, algorithm latency and memory consumption. Suitability of different algorithms for different hardware platforms is discussed, the considered platforms are general-purpose processors (GPPs), graphics processing units (GPUs) and dedicated hardware.

In the fourth chapter, two queue-based morphological algorithms suitable for hardware implementation are described. The second algorithm is one of the novel contributions of this thesis. Performance benchmarks of these two algorithms are included as well.

In the fifth and sixth chapters, hardware implementation of selected efficient algorithms by means of stream processing units is described. The author starts with 1-D dilation unit and uses separability of dilation to build 2-D rectangular and polygonal dilation

units. Special attention is paid to the processing unit for arbitrary-oriented opening and pattern spectrum. Further, parallel computation using several copies of processing units working simultaneously is described. In the seventh chapter, two applications are presented to show real employment of the proposed units. The final eighth chapter contains conclusions.

The thesis is written in line with good scientific criteria and contains sufficient technical novelty. There are three main novel points in the thesis:

- 1) New algorithm for arbitrary-oriented opening and pattern spectrum
- 2) Programmable hardware implementation of basic morphological operators with large structuring elements and arbitrary orientation
- 3) Speedup obtained using parallel computation approach

The novel approaches have been published in three peer-reviewed journal papers (Journal of Real-Time Image Processing) and seven conference proceedings (three of them at prestigious ICIP conference). The author of the thesis is the main author of eight of these ten papers. I consider such publication output as very convincing.

#### Conclusion:

Both theoretical and practical parts of the thesis are well elaborated, clearly explained and easy to follow. I find the approaches presented in the thesis as very promising and believe they have large potential for various future applications.

In conclusion I think that the author has proven to be able of producing scientifically significant outcomes and publishing the data at international forums (including journals and well-known conferences). In my opinion he has fulfilled the criteria for the promotion to a Doctor of Philosophy (Ph.D.) and I recommend acceptance of the thesis for defense.

#### Questions for the defense:

1. In the thesis you described 1-D and 2-D approaches. What about 3-D approaches? How difficult would it be to adapt the described strategies to 3-D?
2. Can you think of adaptation of some of the ideas described in the thesis for speeding up convolution with large kernels?

  
.....  
Michal Kozubek



**Rapport sur les travaux de Monsieur Jan BARTOVSKY en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Université de Paris-Est, spécialité Informatique :**

**« Hardware Architectures for Morphological Filters with Large Structuring Elements »**

*par Mr Olivier DEFORGES, Professeur à l'INSA de Rennes*

---

### **Contexte**

Mr Jan Bartovsky a effectué une thèse en co-tutelle entre l'équipe A3SI de l'Université Paris-Est, et l'Université de Pilsen en République tchèque. Les travaux ont été dirigés par Mohamed Akil (France), Vjaceslav Georgiev (Pilsen), et co-encadrés par Eva Dokladalova (Paris) et Petr Dokladal (Pilsen).

Les objectifs de cette thèse étaient triples. Il s'agissait dans un premier temps de définir des opérateurs morphologiques rapides de type dilatation et ouverture, pour des orientations quelconques, et ce pour de grandes tailles d'éléments structurants. La seconde étape devait consister à définir les architectures matérielles correspondantes et de les mettre en œuvre de manière efficace dans des FPGA. Enfin les opérateurs matériels proposés devaient être intégrés dans des applications de traitement des images.

### **Analyse du mémoire**

Le manuscrit rédigé en anglais comporte 146, découpés en 8 chapitres. Le chapitre 1 est une introduction générale à ce travail. Les chapitres allant de 2 à 3 constituent l'état de l'art de la thèse. Les chapitres suivants présentent les contributions apportées par Jan Bartovsky avec, dans l'ordre, la méthode d'ouverture proposée, son implantation matérielle, les résultats obtenus, et enfin l'utilisation de la méthode pour des applications embarquées. Le dernier chapitre conclut par des conclusions et perspectives.

Le document est bien écrit et structuré, ce qui rend sa lecture très agréable.

**Chapitre 1.** Ce chapitre introduction donne le contexte général de l'étude, ainsi que le plan du document.

**Chapitre 2.** Ce chapitre intitulé « general notions », présente les fondamentaux de la morphologie mathématique. Après un bref rappel des notions principales en géométrie discrète, Jan Bartovsky présente les opérateurs de base (érosion, dilatation, ouverture, fermeture), avant d'introduire les filtres alternatifs séquentiels (ASF) qui seront étudiés plus tard dans le document. Le concept d'analyse granulométrique est enfin introduit : il met

notamment en avant le besoin pour certaines applications d'opérateurs morphologiques linéaires avec des directions quelconques. En conclusion, ce chapitre est très bien décrit et donne une bonne base pour la suite. Seul le nom pourrait être modifié.

**Chapitre 3.** Ce chapitre est un état de l'art du domaine. La première décrit donc les principales solutions algorithmiques rapides pour les opérateurs de base (dilatation et ouverture 1D et 2D). La seconde partie donne différentes solutions d'implantation sur des cibles variées : GPP, GPU et matériels dédiés. Les différentes méthodes sont comparées principalement en termes de complexité de calcul et de latence.

Les méthodes rapides de dilatation 1D foisonnent dans la littérature. La présentation de l'état de l'art sur cette partie est suffisamment concise, en retenant les principales contributions dont celle de [Dokladal 2011]. En revanche, l'état de l'art sur les techniques de dilatation 2D aurait mérité d'être complété. La technique de PRR (« Partial-Result-Reuse ») proposée dans [Chien 2005], qui est présentée plus tard dans la partie architecture, est certes limitée à des ES (Eléments Structurants) rectangulaires, mais est optimale pour ce type de forme, et pourrait être ainsi introduite plus tôt. De même la méthode proposée dans [deforges 2010], avant d'être une architecture dédiée, est avant tout une technique de dilatation 2D par des ES 8-convexes.

Jan Bartovsky présente ensuite les principales techniques d'ouverture 1D. Ces dernières reposent sur deux approches principales : les approches en deux étapes associant érosion puis dilatation, et les approches directes. Parmi ces dernières, une méthode a été récemment proposée par Jan Bartovsky et ses co-auteurs, et qui est appelée « streaming peak elimination ». Pour les ouvertures 2D, les solutions les plus efficaces restent une érosion 2D suivie d'une dilatation 2D.

Les principales solutions d'implantations sur processeurs GPU, DSP et GPP sont présentées. Pour les architectures matérielles, sont retenues les solutions qui ne requièrent que peu de mémoire, avec un flot de données régulier.

En conclusion sur ce chapitre, l'état de l'art proposé est bien synthétisé et clair dans sa forme. Il peut être simplement reproché certains choix de placements de méthodes dans la partie implémentation, alors qu'elles auraient eu leur place dans la partie algorithmique. De plus, il est assez étrange de trouver dans cette partie des contributions de l'auteur.

**Chapitre 4.** Ce chapitre présente deux algorithmes basés « file d'attente » pour des opérateurs morphologiques rapides. Le premier est issu des travaux de Dokladal réalise une dilatation 1D, et peut être ensuite combiné pour obtenir des opérateurs 2D. Le second est proposé par Jan Bartovsky pour des opérations d'ouverture 1D.

L'algorithme de Dokladal procède pixel par pixel. Il est basé d'une part sur une fonction principale de traitement admettant une nouvelle valeur en entrée et fournissant la valeur dilatée sortante, d'autre part sur une boucle externe explorant toutes les positions possibles dans l'ES. Les valeurs inutiles sont éliminées, et la gestion globale des valeurs s'effectue à travers des FIFOs. L'intérêt principal de l'utilisation de files est qu'elle permet de réduire

significativement l'accès direct aux images. Des exemples illustrent le comportement de l'algorithme en 1D.

L'extension de la méthode précédente au cas 2D repose sur la composition d'éléments structurants. La dilatation 1D verticale est réalisée sur le modèle 1D horizontale, en intégrant une matrice de FIFOs de dimension largeur de l'image fois la longueur de l'ES. Des résultats comparatifs montrent l'intérêt de la méthode pour de grands ES, dès lors que le temps d'exécution est fixe. Il aurait été intéressant ici de comparer les résultats avec [Chien 2005]. Le passage à des ES de type polygonal est rendu possible en considérant les orientations obliques ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ ).

La méthode d'ouverture 1D proposée par Jan Bartovsky fonctionne par calcul direct. Elle se base sur la structure générale de technique de dilatation 1D de Dokladal, en respectant un accès régulier et séquentiel aux données. L'opération élémentaire de dilatation est simplement remplacée par une fonction d'élimination de pics. L'extension de l'approche pour des orientations quelconques va ensuite essentiellement consister à estimer la forme de la matrice de FIFO en fonction de l'angle choisi. Les algorithmes ont été portés sur GPP et GPU, et ont montré des résultats très convaincants.

En final, ce chapitre est très bien construit, et apporte des contributions significatives dans le domaine d'algorithmes rapides de morphologie mathématique.

**Chapitre 5.** Cette partie présente une autre contribution importante du mémoire, à savoir les implantations matérielles pour les opérateurs de base en morphologie mathématique. Jan Bartovsky introduit ainsi successivement les architectures matérielles pour la dilatation 1D, la dilatation 2D rectangulaire, la dilatation 2D polygonale, la dilatation 1D synchrone, et enfin l'ouverture 1D.

Le comportement de l'algorithme de dilatation 1D est ici implanté dans une machine d'états (FSM). L'architecture correspondante comprend ainsi deux parties : la FSM et la mémoire. La mémoire contiendra une pile dans le cas d'un traitement horizontal, et  $N$  (largeur de l'image) dans le cas vertical. Deux méthodes sont proposées afin de réduire la dépendance des données, et d'augmenter ainsi le parallélisme.

L'architecture 2D rectangulaire est construite en implantant une dilatation horizontale et une verticale, et en exploitation au mieux les latences et débits de traitement respectifs. Une idée très intéressante est l'introduction d'une intermédiaire FIFO d'équilibrage, qui est ensuite fusionnée avec la FIFO de sortie. Une solution parallèle d'implantation est ensuite proposée par Jan Bartovsky : elle nécessite l'instanciation de « PD » (Parallelism Degree) unités de traitements qui vont opérer sur différents segments dans l'image. Un dernier étage appelé « Switching » permet de router les données.

L'architecture pour la dilution polygonale 2D repose principalement sur l'unité 1D, avec les directions  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $120^\circ$  pour les hexagones,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $135^\circ$  pour les octogones. La capacité mémoire utilisée va dépendre de l'orientation, avec une seule FIFO pour les segments horizontaux,  $N$  pour la direction verticale, et  $(N+B_H)$  pour les directions obliques, avec  $B_H$  la valeur de remplissage horizontal. L'architecture globale est ainsi constituée de

trois parties : le traitement, le contrôle et le remplissage. Comme pour le cas de la dilation 2D par un ES rectangulaire, une solution parallèle est introduite en fonction du paramètre PD. Pour le traitement des longues lignes, une solution appelée « 1D Synchronous Dilalation » est proposée. Elle est basée sur la solution PRR de Chien, adaptée ici aux cas des lignes obliques.

Enfin la dernière contribution de ce chapitre concerne l'architecture correspond à l'algorithme d'ouverture 1D introduite au chapitre précédent. La méthode permet en plus d'estimer le spectre de la forme recherchée, caractérisée ici par l'angle et l'orientation de l'ES. L'architecture globale comprend donc une partie d'ouverture proprement dite, et une pour le stockage et l'accumulation des valeurs pour le calcul du spectre. La solution architecturale finale Sur le principe du parallélisme inter-opérateurs, plusieurs unités de traitement peuvent être définies et ainsi calculer en parallèle les opérations pour différents ES.

Ce chapitre montre en premier lieu l'énorme travail réalisé par Jan Bartovsky sur les aspects implémentations. Toutes les solutions proposées sont justifiées et détaillées de façon très pertinente.

**Chapitre 6.** Ce chapitre détaille de manière approfondie les résultats d'implantations des architectures proposées dans le chapitre précédent, et les compare à l'état de l'art. Cet exercice est très important et ajoute une valeur certaine au document. La comparaison avec d'autres méthodes est un problème complexe dès lors que les conditions initiales ne sont pas équivalentes, ou même que les opérations diffèrent : la plupart des articles pris comme références réalisent des dilatations 2D, or les comparaisons sont faites avec des opérations d'ouverture, et même dans un premier temps, puis avec des filtres ASF. Ainsi Jan Bartovsky propose des extrapolations des autres techniques de manière tout à fait honnête et raisonnée. Malgré tout, certaines simplifications faites, notamment qui supposeraient que pour réaliser  $N$  érosions / dilations il est nécessaire de stocker  $2N$  images, discréditent quelque peu certains résultats.

**Chapitre 7.** Ce dernier chapitre présente l'intégration des architectures précédentes dans deux applications : la plateforme FREIA (FRamework for Embedded Image Applications) et une application embarquée de tri de particules. La plateforme FREIA vise à proposer des unités de traitement ultra rapides pour des applications de traitement des images. La principale contribution est ici l'intégration d'opérateurs rapide avec de grands éléments structurants, ne nécessitant qu'un balayage d'image.

La seconde application vise à classer des particules en fonction de leur forme et de leur taille. Les résultats sont très convaincants d'un point de vue performances, puisque le système est capable de traiter plus de 700 images / seconde.

**Chapitre 8.** Le document se termine par des conclusions et perspectives.

Pour conclusion finale, Jan Bartovsky a effectué un excellent travail de thèse. Il faut avant tout souligner le spectre très large de ses contributions qui partent de la définition de

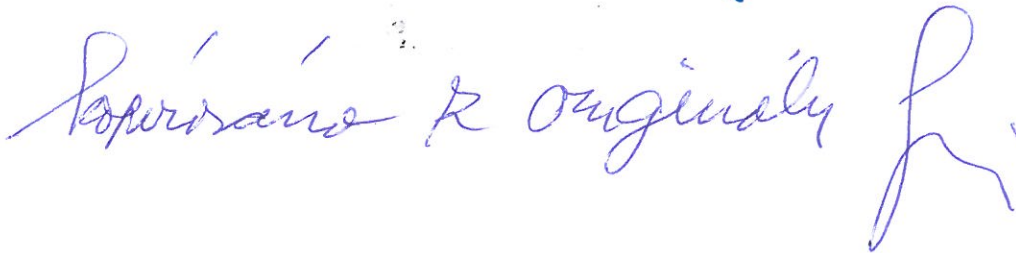
nouveaux algorithmes rapides (ouverture 1D), se situent ensuite dans le domaine de la définition d'architectures dédiées, pour terminer sur les aspects applicatifs. Les aspects nouveaux algorithmes et architectures spécialisées sont notamment rarement abordés conjointement dans la littérature.

Un autre point tout à fait intéressant est que pour chacune des parties, un soin particulier a été apporté sur les aspects formalisation, description et comparaisons / discussions.

Il est par conséquent tout à fait évident que je donne un avis très favorable pour la présentation des travaux de Jan Bartovsky en vue de l'obtention du grade de Docteur de Marne La Vallée, spécialité « Informatique ».

Fait à Rennes le 22 octobre 2012.

Olivier DEFORGES

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.A handwritten signature in blue ink, written in a cursive style, appearing to read "Olivier Deforges".