

THÈSE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN INFORMATIQUE

présentée par

Simon Rit

**Prise en compte du mouvement
respiratoire pour la reconstruction
d'images tomодensitométriques**

**Obtention d'images TDM 4D en salle de traitement
pour la radiothérapie du cancer du poumon**

COMPOSITION DU JURY

Mme.	Isabelle Bloch	Rapporteur
M.	Pierre Grangeat	Rapporteur
Mme.	Isabelle Magnin	Examineur
M.	Grégoire Malandain	Examineur
M.	Marcel Van Herk	Examineur
M.	Serge Miguet	Directeur de thèse
M.	David Sarrut	Co-Directeur de thèse
M.	Francois Spriet	Invité
Mme.	Chantal Ginestet	Invitée

Table des matières

Table des matières	5
Notations	9
Introduction	13
1 Contexte médical	15
1.1 Contexte thérapeutique	16
1.1.1 La radiothérapie	16
1.1.2 La radiothérapie guidée par l'image	17
1.1.3 Prise en compte du mouvement respiratoire en radiothérapie	18
1.1.4 Conclusion	19
1.2 L'imagerie thoracique	19
1.2.1 Tomodensitométrie	19
1.2.2 Tomographie par émission de positrons	19
1.2.3 Imagerie par résonance magnétique	20
1.3 Les tomographes X et leur géométrie d'acquisition	20
1.3.1 Tomographes X 2D	20
1.3.1.1 Les différentes générations	21
1.3.1.2 Les modes axial et hélicoïdal	21
1.3.2 Tomographes X 3D	22
1.3.2.1 Tomographes X multi-barrettes	22
1.3.2.2 Tomographes X coniques avec arceau C	22
1.3.3 Tomographes X en salle de radiothérapie	23
1.3.3.1 Tomographes X de diagnostic <i>in situ</i>	23
1.3.3.2 Tomographes X avec arceau C	24
1.3.3.3 Tomographes X fixés à l'accélérateur linéaire	24
1.3.3.3.1 Tomodensitométrie MV	24
1.3.3.3.2 Tomodensitométrie kV	25
1.3.4 Conclusion	25
1.4 Problématique du mouvement	25
1.4.1 La respiration	26
1.4.2 Artefacts induits par le mouvement	27
1.5 Prise en compte du mouvement en tomographie	27
1.5.1 Méthodes sans information sur le mouvement	28
1.5.2 Méthodes utilisant un signal unidimensionnel	29
1.5.3 Méthodes intégrant un modèle 4D de mouvement	29
2 La reconstruction TDM d'objets statiques	31
2.1 Méthodes analytiques	32
2.1.1 Préliminaires : la reconstruction 2D	32
2.1.1.1 Transformée de Radon 2D	32
2.1.1.2 Théorème coupe-projection	33

2.1.1.3	Reconstruction 2D parallèle	33
2.1.1.4	Reconstruction 2D divergente	34
2.1.2	Méthode de reconstruction 3D : l'algorithme de Feldkamp	35
2.1.3	Implémentation	37
2.1.3.1	Filtrage	37
2.1.3.2	Troncature des projections	38
2.1.3.3	Rétroprojection	38
2.2	Méthodes discrètes	38
2.2.1	Méthode algébrique	39
2.2.2	Implémentation	40
2.2.2.1	Projection	41
2.2.2.2	Rétroprojection	42
2.2.2.3	Ordonnancement	42
2.2.2.4	Artefact d'interpolation	43
2.2.2.5	Troncature	44
2.2.2.6	Paramètres de convergence	44
2.3	Expériences	44
2.4	Résultats	44
2.5	Discussion et conclusion	46
3	Plateforme d'évaluation	47
3.1	Données réelles	48
3.1.1	Caractéristiques du tomographe	48
3.1.2	Données acquises sur patient	49
3.1.3	Données acquises sur fantôme mécanique	49
3.2	Données simulées	51
3.2.1	Fantôme réaliste discret	52
3.2.1.1	Données patients	52
3.2.1.2	Image TDM de référence	53
3.2.1.3	Modèle de mouvement	53
3.2.1.3.1	Champs de vecteurs	53
3.2.1.3.2	Indexation dans le cycle respiratoire	53
3.2.1.3.3	Trajectoire des voxels	54
3.2.1.3.4	Limites	55
3.2.2	Fantôme analytique	56
3.2.3	Signaux respiratoires	57
3.2.3.1	Signal régulier	57
3.2.3.2	Signal irrégulier	57
3.3	Métriques d'évaluation	58
3.3.1	Rapport Signal sur Bruit (RSB)	58
3.3.2	Rapport Contraste sur Bruit (RCB)	59
3.3.3	Critère de flou	59
3.4	Taille et résolution des images reconstruites	59
3.5	Conclusion	59
4	Reconstruction à partir d'une sélection rétrospective de projections co- niques	61
4.1	Le signal respiratoire	63
4.1.1	Etat de l'art	63
4.1.2	Méthode d'extraction automatique du signal respiratoire	64
4.1.2.1	Etape 1 : positionnement de points d'intérêt	64
4.1.2.2	Etape 2 : extraction du mouvement	64

4.1.2.3	Etape 3 : traitement des trajectoires	66
4.1.2.3.1	Projection des trajectoires	66
4.1.2.3.2	Filtrage	66
4.1.2.3.3	Sélection	66
4.1.2.3.4	Agrégation des signaux	67
4.1.3	Expériences	67
4.1.3.1	Paramétrage	67
4.1.3.2	Données	67
4.1.3.3	Métriques	68
4.1.3.3.1	Amplitude	68
4.1.3.3.2	Phase	68
4.1.3.3.3	Tri des projections coniques	68
4.1.4	Résultats	69
4.1.4.1	Critères de sélection	69
4.1.4.2	Amplitude	69
4.1.4.3	Phase	69
4.1.4.4	Tri des projections coniques	70
4.1.5	Discussion	70
4.1.6	Conclusion	72
4.2	Analyse quantitative	72
4.2.1	Méthode	73
4.2.1.1	Reconstruction	73
4.2.1.2	Signal d'entrée : amplitude ou phase	74
4.2.2	Expériences	74
4.2.2.1	Données	75
4.2.2.2	Métriques	75
4.2.2.3	Positions sélectionnées	75
4.2.3	Influence de la largeur de sélection et du signal d'entrée	76
4.2.3.1	Résultats	77
4.2.3.2	Discussion	77
4.2.3.3	Conclusion	83
4.2.4	Influence de l'algorithme de reconstruction	84
4.2.4.1	Résultats	84
4.2.4.2	Discussion	86
4.2.4.3	Conclusion	86
4.2.5	Influence de la fonction de sélection	86
4.2.5.1	Résultats	87
4.2.5.2	Discussion et conclusion	87
4.2.6	Conclusion	89
4.3	Application aux données réelles	89
4.3.1	Expériences	89
4.3.2	Résultats	90
4.3.3	Discussion et conclusion	90
4.4	Conclusion	90
5	Reconstruction avec compensation du mouvement	95
5.1	Etat de l'art	96
5.1.1	Estimation du mouvement à partir des données tomographiques	96
5.1.2	Reconstruction avec compensation du mouvement	97
5.1.2.1	Déformations simples	97
5.1.2.2	Déformations réalistes quelconques	98
5.2	Preliminaires	99

5.3	Reconstruction analytique avec compensation du mouvement	100
5.3.1	Méthode	100
5.3.2	Expériences	101
5.3.3	Résultats	101
5.3.4	Discussion	104
5.3.5	Conclusion	104
5.4	Reconstruction algébrique avec compensation du mouvement	104
5.4.1	Méthode de projection d'un volume déformable discret	105
5.4.1.1	Cas continu	105
5.4.1.2	Cas discret	106
5.4.1.2.1	Approche arrière	107
5.4.1.2.2	Approche avant	108
5.4.2	Méthode de reconstruction	108
5.4.3	Expériences	110
5.4.3.1	Projection	110
5.4.3.2	Inversion de la déformation	110
5.4.3.3	Reconstruction	111
5.4.4	Résultats	111
5.4.4.1	Projection	111
5.4.4.2	Reconstruction	111
5.4.5	Discussion	111
5.4.6	Conclusion	115
5.5	Application aux données réelles	115
5.5.1	Fantôme mécanique	116
5.5.1.1	Expériences	116
5.5.1.2	Résultats	116
5.5.2	Discussion	116
5.5.3	Patient	118
5.5.3.1	Estimation du mouvement	118
5.5.3.2	Expériences	118
5.5.3.3	Résultats	119
5.5.4	Discussion	119
5.6	Conclusion	122
	Conclusion et Perspectives	123
	Index des auteurs cités	129
	Bibliographie	135
	Bibliographie personnelle	149

Notations

Symboles

Communs

		Page
\mathbb{N}^n	Espace de dimension n des entiers naturels	64
\mathbb{R}^n	Espace de dimension n des réels	32
\mathbf{x}	Vecteur des coordonnées de l'espace	32
t	Coordonnée temporelle	55
I_0	Flux de photons émis par la source de rayons X	32
I	Flux de photons mesurés après atténuation	32
μ	Coefficient d'atténuation linéaire d'un matériau	49
f	Fonction des coefficients d'atténuation	32
L	Ligne support du rayon X considéré	32
s_{resp}	Signal respiratoire	63
s_{resp}^p	Phase du signal respiratoire	84

Reconstruction analytique

Fonctions

δ	Fonction Dirac	32
$\mathcal{R}f$	Transformée de Radon 2D de f	32
\mathcal{F}_2f	Transformée de Fourier 2D de f	33
$\mathcal{F}_1\mathcal{R}f$	Transformée de Fourier 1D de la transformée de Radon de f	33
$\mathcal{R}f(\theta, \cdot)$	Projection parallèle de f d'angle θ	32
$\tilde{\mathcal{R}}f(\theta, \cdot)$	Projection parallèle de f filtrée par un filtre rampe	33
P_β	Projection divergente d'angle β	34
P'_β	Projection divergente pondérée	35
\tilde{P}'_β	Projection divergente pondérée puis filtrée par un filtre rampe	35

Coordonnées

x, y, z	Coordonnées cartésiennes de l'espace	32
θ, r, z	Coordonnées cylindriques de l'espace	32
u, v	Coordonnées cartésiennes de l'espace de Fourier 2D	33
θ, ρ	Coordonnées polaires de l'espace de Fourier 2D	33
a, b	Coordonnées sur le capteur plan en géométrie divergente	36

Autres

R	Distance source-isocentre / rayon de la sphère englobante de f	32
$U(\beta, \mathbf{x})$	Distance entre la source à l'angle β et le plan parallèle au détecteur passant par \mathbf{x}	35
β	Angle entre l'axe des coordonnées x et le capteur plan en géométrie divergente	34
γ	Angle entre le rayon passant par l'isocentre et un rayon donné	34

$a'(\beta, \mathbf{x})$	Coordonnée horizontale sur le capteur plan du rayon passant par \mathbf{x} en géométrie divergente	35
$b'(\beta, \mathbf{x})$	Idem verticale	36
g	Noyau de convolution du filtre rampe discret	37
τ	Longueur de la période d'échantillonnage spatial des mesures	37
p	Numéro d'échantillon dans la direction de filtrage	37
H	Fonction de fenêtrage de Hann utilisée pour le filtre rampe	37

Reconstruction algébrique

\mathbf{f}	Vecteur des échantillons de la fonction f	39
h_j	Fonction indicatrice du j ème voxel	39
N	Dimension de \mathbf{f}	39
j	Index de \mathbf{f}	39
\mathbf{B}	Vecteur des mesures (échantillons des projections)	39
M	Dimension de \mathbf{B}	39
i	Index de \mathbf{B}	39
\mathbf{A}	Matrice de projection telle que $\mathbf{A}\mathbf{f} = \mathbf{B}$	39
Δ	Longueur de l'intersection entre un rayon et un voxel	39
$f^{(m)}$	\mathbf{f} estimé après m itérations	40
λ	Paramètre de convergence	40
$\overline{\mathbf{B}}_i$	Estimation de \mathbf{B}	40
$\mathbf{A}_{i,+}^2$	Somme des coefficients au carré de la i ème ligne de \mathbf{A}	40
$\mathbf{A}_{i,+}$	Somme des coefficients de la i ème ligne de \mathbf{A}	40
$\mathbf{A}_{+,j}$	Somme des coefficients de la j ème colonne de \mathbf{A}	40

Reconstruction à partir d'une sélection de projections

κ	Fonction de sélection	73
c	Centre de la fonction de sélection	73
w	Largeur de la fonction de sélection	73
ν	Paramètre de forme de la fonction de sélection	86
$rect$	Fonction de sélection forme de rectangle ou <i>fenêtre de sélection</i>	73
$bump_\nu$	Fonction de sélection en forme de <i>bump</i>	87
$cosq$	Fonction de sélection en forme de cosinus carré	87
$xpow_\nu$	Fonction de sélection en forme d'inverse d'une puissance	87

Reconstruction avec compensation du mouvement

Φ	Mouvement 4D d'un instant de référence vers un instant quelconque	99
Φ_t	Mouvement 3D d'un instant de référence vers un instant t	99
Φ_t^{-1}	Mouvement 3D d'un instant t vers un instant de référence	99
∇f	Matrice jacobienne de f	99
Jac	Jacobien	99
$\Phi_t^{-1}(L)$	Courbe résultant de la déformation de la ligne droite d'acquisition L vers l'instant de référence	105

Plateforme d'évaluation

$\vec{v}_{(a,b)}$	Champ de vecteur entre la phase a et la phase b d'un cycle respiratoire	54
ζ, ξ	Paramètres pour simuler un cycle irrégulier à partir d'un cycle régulier	55
s_0, S, p, T	Paramètres du modèle de Lujan	57
m	Moyenne arithmétique	59
σ	Ecart type	59
R, PP, F	Régions d'une image pour le calcul du rapport contraste sur bruit	59

Extraction du signal respiratoire

Les notations relatives à l'extraction du signal respiratoire, données ci-dessous, ne sont valables que dans le paragraphe 4.1.

N	Nombre de projections coniques de la séquence	64
P_i	i ème projection conique de la séquence	64
M_i	Position d'un point d'intérêt suivi sur la i ème projection	64
x_i, y_i	Coordonnées du point d'intérêt suivi sur la i ème projection	64
B_i	Bloc de pixels de la i ème projections autour du point d'intérêt considéré	64
r	Coefficient de corrélation linéaire	64
Cov	Covariance de l'intensité des pixels de deux blocs	64
Var	Variance de l'intensité des pixels d'un bloc	64
\bar{x}	Moyenne de l'intensité d'un ensemble de pixels	64
r_{min}^2	Seuil de similarité	65
T	Trajectoire d'un point d'intérêt	66
a, b	Bornes temporelles inférieure et supérieure de T	65
s_T	Morceau de signal extrait à partir d'une trajectoire	66
\cdot	Produit scalaire	66
\vec{v}	Vecteur unitaire dans la direction cranio-caudale	66
s'_T	Morceau de signal filtré	66
f_c	Fréquence de coupure pour le filtrage du signal	66
$L(s_T)$	Nombre d'échantillons d'un morceau de signal s_T	66
L_{inf}	Nombre d'échantillons minimum des morceaux de signaux sélectionnés	66
$A(s_T)$	Amplitude moyenne d'un signal s_T	66
A_{inf}	Borne inférieure de sélection pour le critère d'amplitude	66
A_{sup}	Borne supérieure de sélection pour le critère d'amplitude	66
$u(s_T)$	Fréquence pour le pic du spectre en amplitude de la transformée de Fourier de s_T	67
u_{inf}	Borne inférieure de sélection pour le critère fréquentiel	67
u_{max}	Borne supérieure de sélection pour le critère fréquentiel	67
s_{res}	Signal respiratoire extrait	68
s_{ref}	Signal respiratoire de référence attendu	67
G	Nombre de groupes de projections coniques	68
g	Index des groupes de projections coniques	68
s_{resp}^g	Ensemble des valeurs du signal respiratoire pour les projection d'un groupe g	68
w^g	Écarts entre le min et le max de s_{resp}^g	68
N_{mp}	Nombre de points mal triés par le signal extrait	69
$\bar{\sigma}_g$	Moyenne des écarts types des valeurs du signal respiratoire au sein de chaque groupe g	69

Sigles

		Page
TDM	Tomodensitométri-e/-que.....	13
TEP	Tomographie par Emission de Positrons.....	17
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique.....	20
GTV	<i>Gross Tumor Volume</i>	17
CTV	<i>Clinical Target Volume</i>	17
PTV	<i>Planning Target Volume</i>	17
ITV	<i>Internal Target Volume</i>	18
RTA	RadioThérapie Adaptative.....	18
RTGI	RadioThérapie Guidée par l'Image.....	18
OAR	Organes à Risques.....	17
SART	Technique de Reconstruction Algébrique Simultanée.....	39
RSB	Rapport Signal sur Bruit.....	58
RCB	Rapport Contraste sur Bruit.....	59
AMB	Algorithme de Mise en correspondance de Blocs.....	64