Magnetic resonance imaging based correction and reconstruction of positron emission tomography images

Doctoral Thesis**Author(s):**

Oakley, Jonathan David

Publication date:

2000

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003851305>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 13484

Magnetic Resonance Imaging Based Correction and Reconstruction of Positron Emission Tomography Images

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Jonathan David Oakley
B.Sc., M.Phil.
born September 13, 1970

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Gábor Székely, examiner
Prof. Dr. Hans Herzog, co-examiner
Dr. John Missimer, co-examiner

Zurich, January 24, 2000

Abstract

Due to the inherently limited resolution of Positron Emission Tomography (PET) scanners and the subsequent poor ability to resolve detail in reconstructed images, tracer activity observed in active regions such as grey matter (GM) is often less than actual activity; in inactive regions such as white matter (WM), more. Such errors become especially significant in regions having dimensions of less than twice the available resolution. Accuracy of the quantitative measurements taken is thus influenced by the undesirable partial volume averaging of, for example, brain with cerebro-spinal fluid (CSF), bone and scalp regions. Various efforts have been made to correct for this, and more recently, to address the more subtle influence of the so-called partial volume effect (PVE) occurring across regions of GM and WM.

The work presented in this report is toward the support of better quantitative analysis in PET imaging. The emphasis here is to address the problem of limited resolution from a purely information processing perspective; that is, ignoring the role played by the type of tracer used and possible hardware modifications (crystal choice, et. cetera), which will also have a significant influence on such an analysis. On the basis of the data accumulated by the acquisition process, efforts toward better quantification in PET images must begin by operating on the raw, sinogram data. And, as is concluded in this work, all techniques that operate at the image level alone - namely enhancement methods - would be better formulated as part of the reconstruction step.

The general concern of this doctoral work is how to use associated structural information to improve the quality of the PET images. This information is available in the form of Magnetic Resonance Imaging (MRI) data, a modality capable of resolving fine structural detail in the brain. Within this topic area, the specifics of the thesis work can be broadly classified into four themes, and to each of these I can cite a contribution to the existing knowledge and technology.

The first covers method of PVE correction applied in accordance to associated structural information at the image level. A limiting factor of such techniques is the assumed homogeneity in the within-tissue activity distribution. The implementation presented here forsakes such an assumption, and models the variation in terms of basis functions.

The remaining themes arose from the shortcomings of this correction method, taking the research into the field of statistical image reconstruction. Within this realm, the second contribution comprises an interpolation technique that, in modelling uncertainty about the emission source, is able to produce better regularised and improved resolution reconstructions.

Akin to the second contribution, the third aspect of the work seeks also to address

misgivings of the pixel-based correction methods, this time with regard to the use of the “prior” information. Here, a more robust and theoretically stringent pseudo-Bayesian approach¹ has been developed, as well as extensions to the full Bayesian methods². This has included a scheme for coupling the pixel-based correction method with a reconstruction scheme in order to relax to a solution compromising them both.

Having developed algorithms for reconstructing PET images constrained in accordance to associated structural information, doubts remain concerning the degree of influence afforded to the “prior”, as well as regarding the computational overheads. The fourth and final aspect of this work deals with these issues, and in doing so this doctoral work has been able to address each aspect of the initial project proposal. This involves an anisotropic resolution representation of the image data, where the resolution is adapted in accordance to either the structural information, or, where this is not to hand (which is actually likely to be the case in most clinical settings), in accordance to local estimates of the image’s signal to noise ratio. In simulated studies the resulting images have consistently shown lower errors, and in real patient studies the results are impressive. Potential over-bias resulting from the use of “prior” knowledge (that in many cases is likely to be inaccurate) is removed, and the computational costs are acceptable for use in the clinical environment.

¹Those better suited to transmission image reconstruction.

²Those better suited to emission image reconstruction.

Zusammenfassung

Bedingt durch die niedrige Auflösung von Positronenemissionstomographen (PET) besitzen die rekonstruierten Bilder einen sehr eingeschränkten Detailreichtum. An den Grenzen zwischen aktiven und inaktiven Regionen wird daher die Aktivität des Tracers in aktiven Regionen, wie der grauen Substanz (GM), unterschätzt und in inaktiven Regionen, wie der weissen Substanz (WM), überschätzt. Dieser Effekt ist besonders bedeutsam bei der Abbildung von Strukturen, deren Ausdehnungen unter dem zweifachen der erreichbaren Auflösung liegen. Die Genauigkeit quantitativer Messungen wird durch die unerwünschte Mittelung über beispielsweise Hirnsubstanz, Gehirn-Rückenmark-Flüssigkeit (CSF), Knochen und Kopfhaut, eingeschränkt. Die auftretende Mittelung bezeichnet man als „partial volume effect“ (PVE). Zahlreiche Versuche wurden unternommen dieses Problem zu lösen. In letzter Zeit wird zudem untersucht, wie die schwieriger zu beherrschenden Effekte, die an der Grenze zwischen weisser und grauer Substanz auftreten, kontrolliert werden können.

Im Rahmen der vorliegenden Doktorarbeit wurden Verfahren zur verbesserten quantitativen Rekonstruktion von Positronenemissionstomographien entwickelt. Das Problem der eingeschränkten Auflösung wurde dabei ausschliesslich vom Informationsverarbeitungsstandpunkt aus angegangen. Verbesserungsmöglichkeiten durch eine geeignetere Wahl der Tracer und Modifikationen am Tomographen (Auswahl der Detektorkristalle, u.a.) wurden nicht berücksichtigt, obwohl ihnen in der Praxis eine bedeutende Rolle zukommt. Bemühungen um eine bessere quantitative Rekonstruktion von PET-Bildern aus den bei der Bildakquisition gewonnenen Daten müssen bei den unverarbeiteten Sinogrammdaten ansetzen. Im Resümee dieser Arbeit wird sich zeigen, dass alle Verfahren, die nur auf der Basis rekonstruierter Bilder arbeiten, die sogenannten Enhancement-Verfahren, besser als Teil des Rekonstruktionsprozesses formuliert würden.

Das Hauptanliegen dieser Doktorarbeit ist, darzulegen, wie zugehörige strukturelle Information die Qualität der PET Bildgebung verbessern kann. Derartige Information ist in Form von Magnetresonanzbildern (MRI Bildern) in einer hochauflösenden Variante vorhanden. Innerhalb dieser Thematik kann diese Arbeit in vier Schwerpunkte eingeteilt werden, wobei jeweils ein Beitrag zum aktuellen Stand der Forschung und der Technologie geleistet wurde. Der erste Schwerpunkt liegt in der Korrektur des Teilvolumeneffektes (PVE) basierend auf zugehöriger struktureller Information auf der Ebene des Bildes. Der begrenzende Faktor ist dabei die angenommene Homogenität der Aktivität innerhalb des Gewebes. Die vorgestellte Implementierung verzichtet eine derartige Annahme und modelliert diese Verteilung mit Basisfunktionen.

Die weiteren Themen ergeben sich aus den Defiziten dieser Korrekturmethode und führen in das Gebiet der statistischen Bildrekonstruktion. Innerhalb dieses Gebiets stellt

der zweite Schwerpunkt einen Beitrag zur verbesserten Interpolation dar, welcher die Unsicherheiten in den Emissionsquellen berücksichtigt und deshalb eine bessere Regularisierung und eine verbesserte Auflösung der Rekonstruktion ermöglicht.

Ähnlich wie der zweite Beitrag korrigiert der dritte Aspekt dieser Arbeit ein Defizit der pixelbasierten Korrektur, diesmal in Bezug auf verwendete „prior“ Information. Dabei wurde sowohl ein theoretisch konsequenter pseudo-Bayesscher Ansatz entwickelt, als auch eine vollständig Bayessche Korrekturmethode. Erstere eignet sich dabei besser für Transmissionsbildrekonstruktion und letztere für Emissionsbildrekonstruktion. Dies schliesst auch ein Verfahren ein, welches die pixelbasierte Korrektur mit der Rekonstruktion verbindet und so eine Lösung liefert, welche beide Verfahren umfasst.

Ausgehend von den Verfahren zur Rekonstruktion mittels zugehöriger struktureller Information kommt die Frage auf, wie gross der Einfluss des „Priors“ und der benötigte Rechenaufwand sind. Der vierte und abschliessende Aspekt dieser Arbeit behandelt diese Punkte und erfüllt damit alle Anforderungen des ursprünglichen Projektantrages. Hierbei kommt eine anisotrope Auflösungsdarstellung der Bilddaten zur Anwendung, bei welcher die Auflösung entweder an die vorhandenen strukturellen Daten oder - falls diese fehlen (was in der tatsächlichen klinischen Anwendung meist der Fall sein dürfte) - entsprechend dem lokalen Signal-zu-Rausch Verhältnis angepasst werden. In simulierten Studien zeigten die resultierenden Bilder durchweg kleinere Fehler, und in Studien mit echten Patienten konnten eindrucksvolle Resultate erzielt werden. Ein mögliche Überbewertung der oft ungenauen „prior“ Information wird dadurch entfernt, und gleichzeitig wird der benötigte Rechenaufwand auf ein für klinische Verhältnisse erträgliches Mass reduziert.