

Schnelle Shift-Average-Rekonstruktion für die koplanare Translationslaminographie

Andreas DERESCH *, Kai-Uwe THIESSENHUSEN *,
Uwe EWERT *, Carsten BELLON *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kurzfassung

Insbesondere bei der tomographischen Inspektion großer und flacher Bauteile kommt die koplanare Translationslaminographie (auch Planartomographie) zum Einsatz. Hierüber wird an anderer Stelle zur Querschnittsabbildung von Schweißnähten, Brückenstrukturen und Faserkompositen berichtet (Vortrag Mi.3.C.2). Zum effektiven Einsatz der Laminographie wurde ein schneller Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt.

Bei einer tomographischen Rekonstruktion werden die Daten gemessener Projektionen aus der Detektorebene in den Rekonstruktionsraum transformiert. Während eine Berechnung der entsprechenden Positionen nach der Strahlensatzgeometrie für jeden einzelnen Punkt im Rekonstruktionsraum nötig ist, ermöglicht ein numerischer Verschiebealgorithmus mit Mittelung über die Projektionen (Shift-Average) die Berechnung mit höherer Effizienz. Dieser Algorithmus ist anwendbar bei koplanarer Anordnung von Detektorebene und Translationsrichtung der Strahlenquelle. Alle Projektionen werden vor der Anwendung des Shift-Average-Algorithmus in Translationsrichtung der Strahlenquelle gefiltert. Die Projektionen werden entsprechend der bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit der Strahlenquelle nichtlinearen Einstrahlwinkeländerung gewichtet. Die resultierenden rekonstruierten Datensätze entsprechen denen nach der exakten Strahlensatzgeometrie mit Ausnahme eines Streckungsfaktors für die gesamte Schicht, welcher nach der Rekonstruktion korrigiert wird.

Die Rechenzeit ist wie beim klassischen Verfahren annähernd proportional zum Produkt aus der Zahl der Projektionen, der Zahl der Detektorpixel, sowie der Zahl der berechneten Rekonstruktionsschichten. Durch die Ausführung auf einer Grafikkarte kann die Rechenzeit dabei deutlich verkürzt werden. Bei praktischer Anwendung konnte eine Verkürzung um etwa den Faktor 60 erzielt werden. Die Rekonstruktion von 170 Schichten aus einem Datensatz mit 400 Projektionen zu 1026 x 252 Pixeln erfordert dort etwa 5,5 Sekunden im Vergleich zu über 5 Minuten nach dem klassischen Algorithmus auf einem Mehrkern-Prozessor.

Die Rechenzeiterparnis wirkt sich besonders bei iterativen Verfahren wie ART aus, wo eine Vielzahl von derartigen Transformationen zwischen Rekonstruktions- und Projektionsraum erforderlich ist.



Schnelle Shift-Average-Rekonstruktion für die koplanare Translationslaminographie

Andreas Deresch, Kai-Uwe Thiesenhusen, Uwe Ewert, Carsten Bellon
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Motivation

Insbesondere bei der tomographischen Inspektion großer und flacher Bauteile kommt die koplanare Translationslaminographie (auch Planartomographie) zum Einsatz. Bei dem Verfahren liegt stets ein eingeschränkter Winkelbereich vor, während die Anzahl der Projektionen üblicherweise nicht stark eingeschränkt ist. Zum effektiven Einsatz der Laminographie wurde ein schneller Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt. Dieser wird hier in einer gefilterten Rückprojektion angewandt, eignet sich aber auch für die Umsetzung in ART-Verfahren (Algebraic Reconstruction Technique).

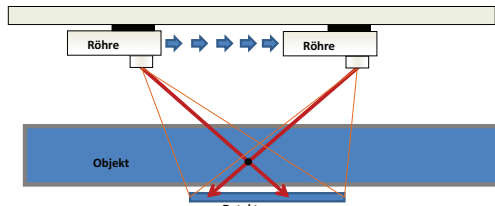


Abbildung 1: Schema einer Translationslaminographie

Rekonstruktionsprinzip

Die koplanare Anordnung von Detektorebene und Translationsrichtung der Strahlenquelle ermöglicht die Anwendung eines effizienten Shift-Average-Algorithmus. Hierbei werden als einzige Operationen Translation und Summenbildung benötigt. Die resultierenden rekonstruierten Datensätze entsprechen denen nach der exakten Strahlensatzgeometrie mit Ausnahme eines Streckungsfaktors für die gesamte Schicht, welcher nach der Rekonstruktion korrigiert wird.

Strahlensatzgeometrie:

Eine Stelle im Objekt wird je nach Röhrenposition auf unterschiedliche Detektorpositionen abgebildet. Bei der Rückprojektion überlagern sich die Strahlen aus verschiedenen Projektionen an der ursprünglichen Stelle im Raum. Die Strukturen werden wieder an der „richtigen“ Stelle abgebildet.

Parallelstrahlennäherung („shift average“):

Statt einzelner Strahlen werden gesamte Projektionen überlagert. Dies ermöglicht deutlich kürzere Rechenzeiten. Die entstehenden Resultate sind bis auf einen für jede Schicht einheitlichen Streckungsfaktor identisch mit denen der Strahlensatzgeometrie. Strukturen werden wieder an der „richtigen“ Stelle abgebildet.

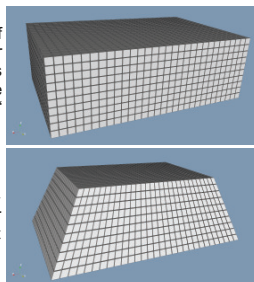


Abbildung 2: Rekonstruktionsvolumen bei Strahlensatzgeometrie und Parallelstrahlennäherung

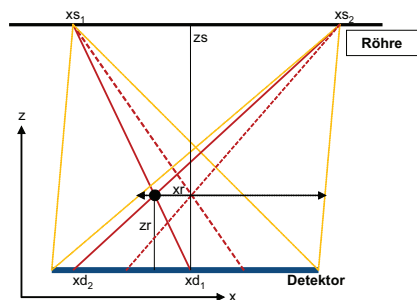


Abbildung 3: Rekonstruktion nach Strahlensatzgeometrie

Rekonstruktion nach der Strahlensatzgeometrie:

Eine Stelle im Objekt (schwarzer Kreis) an der Position (x_r, z_r) wird je nach Röhrenposition auf unterschiedliche Detektorpositionen abgebildet und bei der Rückprojektion auf die originale Stelle im Raum abgebildet.

Als Beispiel sind zwei Röhrenpositionen x_{s_1} und x_{s_2} und die entsprechenden Detektorpixel x_{d_1} und x_{d_2} dargestellt. Der Abstand z_s zwischen Röhrenachse und Detektor ist konstant. Die y -Dimension wird hier nicht dargestellt.

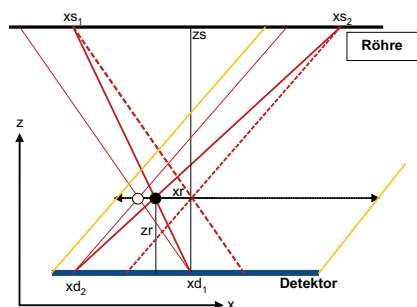


Abbildung 4: Rekonstruktion nach Parallelstrahlennäherung

Rekonstruktion nach Parallelstrahlennäherung (shift average):

Eine Stelle im Objekt (schwarzer Kreis) an der Position (x_r, z_r) wird je nach Röhrenposition auf unterschiedliche Detektorpositionen abgebildet.

Bei der Rückprojektion mit Verschiebung ganzer Projektionen entsteht das Objektbild an etwas anderer Stelle als das Original (weißer Kreis). Jede Rekonstruktionsschicht wird dabei vergrößert. Ansonsten bleibt das resultierende Bild identisch mit dem bei der Strahlensatzgeometrie entstehenden.

Algorithmus

- Volumenrekonstruktion (genauer: Rekonstruktion paralleler Schnittbilder)
- Gefilterte Rückprojektion der logarithmierten Messdaten
- Besonders einfach durch Geometriebeschränkungen
 - Anwendung eines Shift-Average-Algorithmus
 - Transformation jeweils einer kompletten Projektion
 - möglichst wenige und einfache Operationen im Hauptteil ($N_{\text{Projektionen}} \cdot N_{\text{Schichten}}$)
⇒ Verlegung vieler Operationen in Vor-/Nachverarbeitung ($N_{\text{Projektionen}}$ oder $N_{\text{Schichten}}$)
- Korrektur
 - Unterschiedliche Einstrahlwinkel und Abstände der einzelnen Pixel („Shading“) werden vor der Filterung ausgeglichen.
 - Die Projektionen werden entsprechend der bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit der Strahlenquelle nichtlinearen Einstrahlwinkeländerung gewichtet.
 - Zur Reduzierung der für einen eingeschränkten Winkelbereich typischen Artefakte können optional die äußeren Projektionen zusätzlich geringer gewichtet werden.

Alle Projektionen werden vor der Anwendung des Shift-Average-Algorithmus in Translationsrichtung der Strahlenquelle gefiltert. Die Filterung erfolgt normalerweise im Ortsraum (Kak, Slaney: Principles of Computerized Tomographic Imaging).

- Umsetzung auf GPU sehr einfach, schnelle Ausführung
- variable Filterlänge ermöglicht Kompromiss zwischen Shading-Korrektur und Erhalt von in Verschieberichtung orientierten Strukturen
- nur bei großer Filterlänge offset-frei

Implementation

Um eine Online-Rekonstruktion zu ermöglichen, werden die Projektionen der Reihe nach eingelesen und in das Rekonstruktionsvolumen rückprojiziert, welches während der gesamten Rechnung vollständig vorgehalten wird.

Auf Grund der Anwendung identischer Operationen auf alle Pixel einer Projektion bzw. Voxel einer Rekonstruktionsschicht ist der Algorithmus gut für die Ausführung auf einer GPU geeignet. Des Weiteren sind nur wenige Berechnungen auszuführen – die Leistung wird hauptsächlich durch die verfügbare Speicherbandbreite bestimmt. Insbesondere höherwertige Grafikkarten zeigen hier große Vorteile gegenüber der CPU. Um die zur Verfügung stehende Speicherbandbreite optimal zu nutzen, werden in jedem Durchlauf mehrere Projektionen gelesen und gleichzeitig in mehrere Rekonstruktionsschichten geschrieben. Dies reduziert die Anzahl erforderlicher Lese- und Schreibzugriffe. Durch die textur-basierte Implementation unter Verwendung von OpenGL und GLSL ist das Programm sehr portabel und fast überall lauffähig. Die vorliegende Implementation kann die eigentliche Rückprojektion sowohl mit Gleitkommazahlen einfacher als auch halber Genauigkeit durchführen. Letzteres bewirkt bei minimaler Reduktion der Ergebnisgenauigkeit eine weitere Beschleunigung (ca. 1.5- bis 2-fach). Selbst auf tragbaren Rechnern ist eine sehr schnelle Rekonstruktion möglich.

Anwendungsbeispiel

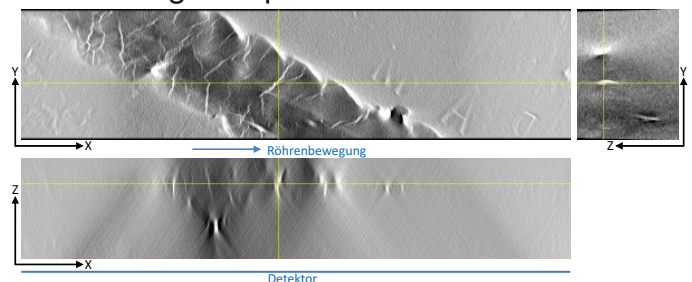


Abbildung 5: Rekonstruktion der Schweißnaht „BAM5“ (Stahl) mit feinen Rissen (hell). Oben ein x-y-Schnitt parallel zur Detektorebene in der Decklage der Schweißnaht, unten x-z- und rechts y-z-Schnitte. Der Detektor befindet sich in der x-z-Darstellung rechts. Die Richtung der Röhrenbewegung ist parallel zur x-Achse.

Die Rekonstruktion der Schweißnaht „BAM5“ erfolgte unter Anwendung des hier vorgestellten Algorithmus aus 400 Projektionen mit jeweils 1026x252 Pixeln. Das rekonstruierte Volumen besteht aus 170 Schichten von 1026x252 Voxeln.

Die vorgestellte Implementation benötigte für diese Rekonstruktion 5,5 s auf einer low-end GPU (AMD Radeon HD 7450, 1 GB), der klassische Algorithmus 310 s auf der Vierkern-CPU (Intel i7-3770 3,40 GHz und 16 GB RAM) des selben Rechners.

Zusammenfassung

Es wurde ein Rekonstruktionsverfahren für die Translationslaminographie entwickelt und implementiert. Durch die Anwendung eines Algorithmus mit geringem Rechenaufwand und Ausführung desselben auf einer modernen Grafikkarte wird eine 50- bis 100-fache Beschleunigung gegenüber einer klassischen Implementation möglich.

Die Rechenzeitersparnis wirkt sich besonders bei iterativen Verfahren wie ART aus, wo eine Vielzahl derartiger Transformationen zwischen Rekonstruktions- und Projektionsraum erforderlich ist.

Die vorliegende Implementation ermöglicht eine Online-Rekonstruktion, so dass der Zeitabstand zwischen Aufnahme der Projektionen und Vorliegen des rekonstruierten Volumens minimiert wird.

Kontakt: **Andreas Deresch**
Tel.: +49 30 8104 4357
E-mail: Andreas.Deresch@bam.de

Die Autoren danken Dr. Christian Gollwitzer für Anregungen zur OpenGL-Implementation. Diese Arbeit wurde unterstützt durch das EU-Projekt TomoWELD (www.tomoweld.eu).

