

Approximation der Projektionsmatrizen einer C-Bogen 3D-Fahrt anhand der Odometriedaten

Daniel Stromer^{1,2}, Andreas Maier¹

¹Pattern Recognition Lab, FAU Erlangen-Nürnberg

²Siemens AG Healthcare H IM AX R&D SC

daniel.stromer@medtech.stud.uni-erlangen.de

Kurzfassung. Bei aktuellen boden-montierten C-Bogen Röntengeräten wird durch eine neue Motorsteuerungstechnologie die Aufnahme der Odometriedaten ermöglicht. In dieser Arbeit wird ein Algorithmus beschrieben, der anhand einer bestehenden Datenbank, die mit Geometrie-Kalibrierungen und deren synchron aufgenommenen Odometriedaten, die Projektionsmatrizen für eine spätere Rekonstruktion approximiert. Nachdem Gütekriterien für eine 3D-Fahrt ausgewählt wurden, wird ein Algorithmus vorgestellt, der die am besten passenden Projektionsmatrizen für die jeweilig durchgeführte Fahrt annähert. Die Genauigkeit der berechneten Matrizen wird dann anhand der Originalmatrizen überprüft. Die Auswertung ergab eine durchschnittliche Fehlerreduzierung um bis zu 30.7%. Dies wird auch in den resultierenden Rekonstruktionen ersichtlich.

1 Problemstellung

Für C-Bogen Röntgensysteme müssen 3D-Fahrten exakt reproduzierbar sein, da im Falle einer Störung (z.B. leichte Kollision) eine Rekonstruktion unmöglich wird. In diesem Falle wäre ein Patient der applizierten Strahlendosis umsonst ausgesetzt gewesen. Bisherige C-Bogen Röntengeräte waren nicht in der Lage Abweichungen in einer Fahrt festzustellen. Eine neue Generation der Antriebssteuerung (Sinumerik, 840 d SI [1]), ermöglicht bei aktuellen Systemen die Aufnahme der Odometriedaten einer Fahrt. Aus diesen Fahrtdaten kann nun auftretender Verschleiß oder eine Hindernisüberwindung anhand von Antriebsparametern analysiert werden um bei deren Auftreten mit Korrekturmaßnahmen zu reagieren. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Algorithmus vorzustellen, der die Odometriedaten einer 3D-Fahrt analysiert und anhand einer angelegten Datenbank, die berechnete Projektionsmatrizen und deren Odometriedaten beinhaltet, die am besten zur Fahrt passenden Projektionsmatrizen approximiert. Durch diese Maßnahme soll die Rekonstruktion genauer und anpassungsfähiger für Abweichungen, wie beispielsweise Komponentenverschleiß, werden.

2 Methoden

2.1 Gütekriterien

Um bewegungsspezifische Fehler bei der Geometrie-Kalibrierung feststellen zu können, müssen zuerst Variablen der Sinumerik gefunden werden, die die Identifizierung von Odometrieabweichungen in einer 3D-Fahrt ermöglichen. Da bei einer 3D-Fahrt lediglich die C-Bogen Rotationsachse verfahren wird, müssen nur Parameter dieser Achse überwacht werden. Als erster Parameter wurde die aktuelle Ist-Geschwindigkeit der Achse ausgewählt. Ein weiteres aussagekräftiges Gütekriterium der Fahrt ist der drehmomentbildende Ist-Strom dieser Achse. Treten äußere Einwirkungen auf die Achse auf, so wird über diesen Parameter die Geschwindigkeit sofort nachgeregelt. Abweichungen im Vergleich zu störfreien Fahrten werden durch diese Variable sofort durch markante Sprünge ersichtlich.

2.2 Generieren der Datenbank

Für den vorliegenden Testzweck wird ein Drive Trace eingerichtet, der die festgelegten Gütekriterien jede 5 ms aufzeichnet. Als Start-Trigger wird eine manuelle Tastenbetätigung mit einer Zeitdauer von 10 s konfiguriert. Im Strahlengang wird das PDS-2 Phantom [2] positioniert und bei jeder Fahrt zusätzlich zum Drive Trace eine Bilderserie aufgenommen, um daraus später die benötigten Projektionsmatrizen der Geometriekalibrierung berechnen zu können [3]. Es wurden fünf korrekte 3D-Fahrten und fünfzehn störbehaftete Fahrten durchgeführt. Als Störquelle werden Latexbänder (Thera-Band®[®], Dornburg) verschiedener Stärken (stark, spezial stark, extra stark) am Detektorschlitten der Rotationsachse und am Boden mit Klebeband fixiert (Abb. 1(a)), die bei maximaler Dehnung an der jeweiligen Position reißen und einen Ruck in der Fahrt verursachen.

2.3 Approximationsalgorithmus

Nach Aufruf der während der 3D-Fahrt akquirierten Odometriedatei \mathbf{O}_{app} , glättet ein Mittelwert Filter (Filterbreite 35 ms) eine Strom-Istwert Kurve (D_F). Der Wert wird gewählt, da bei 133 Bildern in einem Aufnahmelauflauf von fünf Sekunden die Abtastrate 35 ms beträgt. Später wird dann das Ergebnisfeld an jedem Projektionswinkel λ abgetastet und der Wert gespeichert. Um Störeinflüsse der Fahrt zu erkennen, wird ein Ableitungsfilter auf die gefilterte Kurve angewandt und die Ergebnisse erneut Mittelwert gefiltert abgelegt (D_A). Eine Abweichung wird durch eine zeitabhängige Schwellwertüberschreitung der Ableitungskurve detektiert. Im Bereich konstanter Geschwindigkeit wird im Falle einer Abweichung stärker nachgeregelt und die Odometriedatei als störbehaftet erkannt. Als Ausgangsdaten für die Approximation werden die Mittelwert gefilterten Odometriedaten und Ableitungen der Datenbankeinträge \mathbf{O}_{db} verwendet. Diese wurden vorher ebenfalls auf Abweichungen in der Fahrt überprüft und das Ergebnis per Flag gespeichert. Wurde keine Störung in der zu approximierenden 3D-Fahrt erkannt, werden, um genauere Ergebnisse zu erhalten, nur

Odometrie-Datenbankeinträge ohne Störungen herangezogen. Es wird immer die minimalste Abweichung (1) von der zu prüfenden Odometriedatei gesucht und der beste Datenbankeintrag i^* derjenigen Odometriedatei gespeichert

$$i^* = \operatorname{argmin}_i d(\mathbf{O}_{\text{app}}, \mathbf{O}_{\text{db},i}) \quad (1)$$

Eine Funktion $d(\mathbf{O}_{\text{app}}, \mathbf{O}_{\text{db},i})$ berechnet hierbei die Odometrieabweichung zwischen der zu approximierenden und der in der Datenbank liegenden Datei mit der Länge N

$$d(\mathbf{O}_{\text{app}}, \mathbf{O}_{\text{db},i}) = \begin{cases} d_{\text{corr}}, & \text{wenn } \mathbf{O}_{\text{app}} = \text{störungsfrei} \\ d_{\text{dist}}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

Je nachdem ob das Abweichungsflag gesetzt ist oder nicht, wird die zugehörige Funktion aufgerufen (Korrekte Fahrt: d_{corr} (3) – gestörte Fahrt: d_{dist} (4)). w_1 bzw. w_2 sind Gewichtungsfaktoren, die die Genauigkeit der Approximation bei Störfahrten erhöhen. w_1 wird daher für korrekte Fahrten auf 1 gesetzt. Bei störbehafteten Fahrten werden $w_1 = 2$ und $w_2 = 4$ gewählt. Die Funktion D_{Reg} berechnet die Regressionsgerade der n vor und nach dem Punkt i liegenden Ableitungen. Diese Maßnahme soll die Genauigkeit hinsichtlich des Nachschwingens bei einer Hindernisüberwindung verbessern

$$d_{\text{corr}} = \frac{\sum_{l=0}^{N-1} \sqrt{\sum_{k=0}^2 (D_F(O_{\text{app},l,k}) - D_F(O_{\text{db},i,l,k}))^2}}{\sqrt{1 + w_1 \cdot \sum_{k=0}^2 (D_A(O_{\text{app},l,k}) - D_A(O_{\text{db},i,l,k}))^2}} \quad (3)$$

$$d_{\text{dist}} = \sum_{l=0}^{N-1} \sqrt{d_{\text{corr}}^2 + w_2 \cdot \sum_{n=1}^3 (D_{\text{Reg}}(\mathbf{O}_{\text{app},l,n}) - D_{\text{Reg}}(\mathbf{O}_{\text{db},i,l,n}))^2} \quad (4)$$

i^* enthält dann den Datenbankeintrag derjenigen Matrix, die die niedrigste Abweichung von der Originalodometriedatei aufweist. Dies wird für jeden Winkel λ durchgeführt. Danach werden diejenigen korrespondierenden Projektionsmatrizen der Odometrie-Datenbankeinträge mit der kleinsten Abweichung am Projektionswinkel λ gesetzt (5)

$$P_{\lambda}^* = P_{\lambda}^{i^*} \quad (5)$$

Um die approximierten Projektionsmatrizen mit den Originalmatrizen zu vergleichen, werden schlussendlich die k Projektionsmatrizen voneinander subtrahiert und aus dem Ergebnis die k Frobeniusnormen [4] der erhaltenen Matrix berechnet. Der erhaltene Wert wird dann wiederum durch k dividiert. Umso näher der Wert sich gegen 0 bewegt, desto höher ist die Genauigkeit der Approximation. Daraus ergibt sich der Fehler der Approximation (6). Damit dieser

Tabelle 1. Abweichungen der approximierten Projektionsmatrizen für 3D-Fahrten sortiert nach dem Schweregrad der provozierten Störung. Im Durchschnitt kann der Fehler um 30.7% gesenkt werden.

Fahrt	Störungsgrad	Fehler ohne Korrektur	Fehler mit Korrektur
1	kein	0.25280	0.22427
2	kein	0.25280	0.26117
3	kein	0.08384	0.07120
4	kein	0.09277	0.06927
5	kein	0.08329	0.20166
6	schwach	1.59156	1.37683
7	schwach	2.40949	1.48036
8	schwach	2.04357	1.13684
9	schwach	2.45058	1.36779
10	schwach	1.98897	1.29668
11	mittel	1.40547	1.27338
12	mittel	2.09694	1.43490
13	mittel	2.13575	1.36560
14	mittel	2.36305	1.80143
15	mittel	2.69442	1.62313
16	stark	2.12311	1.48685
17	stark	1.69686	1.57231
18	stark	1.60749	1.27707
19	stark	1.71238	1.60487
20	stark	2.55049	1.29744
Aus allen Störungen		2.05801	1.42637

Fehler als aussagekräftig angesehen werden kann wurden alle Projektionsmatrizen gleich normiert. Bei allen Matrizen war das zwölfte Element auf 1 normiert

$$\text{Fehler} = \frac{1}{k} \sum_{\lambda=0}^{k-1} \|P_{\lambda} - P_{\lambda}^*\|_F \tag{6}$$

3 Ergebnisse

Tab. 1 zeigt den Fehler der Projektionsmatrizen ohne bzw. mit Korrektur durch den Approximationsalgorithmus. Fahrt ist hierbei die jeweilige 3D-Fahrt, deren Projektionsmatrix im leave-one-out-Verfahren berechnet wurde. Störungsgrad gibt das benutzte Latexband an. Hierbei ist zu beachten, dass der Abrisszeitpunkt nicht genau festgelegt werden kann, was Auswirkungen auf die Gesamtabweichung hat. Umso früher der Abriss geschieht, umso höher ist die Gesamtabweichung, was zur Folge hat, dass bei frühem Abriß des schwächsten Bandes

die Gesamtabweichung höher sein kann, als bei einem starken Band das spät reißt. Fehler ohne Korrektur listet den Fehler nach (6) auf, wenn einfach die Projektionsmatrizen der Fahrt 1 herangezogen werden (bzw. Fahrt 2 bei Fahrt 1) und Fehler nach Korrektur gibt den Fehler der approximierten Projektionsmatrizen an. Ist der Fehler kleiner als 0.3 kann von einer reproduzierbaren Fahrt ausgegangen werden. Es wird ersichtlich, dass ausser bei Fahrt 5 und Fahrt 2, die Abweichungen durch den Algorithmus signifikant verringert wurden. Alle Ergebnisse der Fahrten 1-5 können als reproduzierbar angesehen werden. Ebenso ist erkennbar, dass je stärker der Abriss zu sein schien desto weniger genau die Approximation wird. Nun wurde mit den ursprünglichen Projektionsmatrizen von Fahrt 13 (Abb. 1(b)) nach altem Schema eine Rekonstruktion durchgeführt, die ebenfalls nur geringe Störungen aufzeigt. Ist eine korrekte Kalibrierung vorhanden, kann also trotz Störung korrekt rekonstruiert werden.

Abb. 2 zeigt die Vergrößerung einer Rekonstruktion von Störfahrt 13 auf eine Metallkugel mit den originalen Projektionsmatrizen (Abb. 3(a)) und ohne (Abb. 3(b)) bzw. mit Korrektur (Abb. 3(c)). Hier wird eine deutliche Verbesserung durch Anwenden des Algorithmus ersichtlich. Das Verfahren verbessert die Ergebnisse bei Hochkontrast (z.B. Metall oder Knochen) für störbehaftete 3D-Fahrten. Eine Auswertung für Niedrig-Kontrast-Anwendungen war nicht möglich, da das verwendete 5s-Protokoll nur für Hochkontrast-Anwendungen zugelassen ist. Wir vermuten, dass durch die geringe Anzahl der Datenbankeinträge zu wenig Störfalldateien in der Datenbank sind, um wirklich Abweichungen jeder Art für eine Niederkontrast-Anwendung abdecken zu können. Der Abrisszeitpunkt des Klebebandes liess sich zudem nur schlecht reproduzieren. Eine Datenbankvergrößerung könnte eine ausreichende Approximation auch für störbehaftete Fahrten in diesem Bereich ermöglichen.

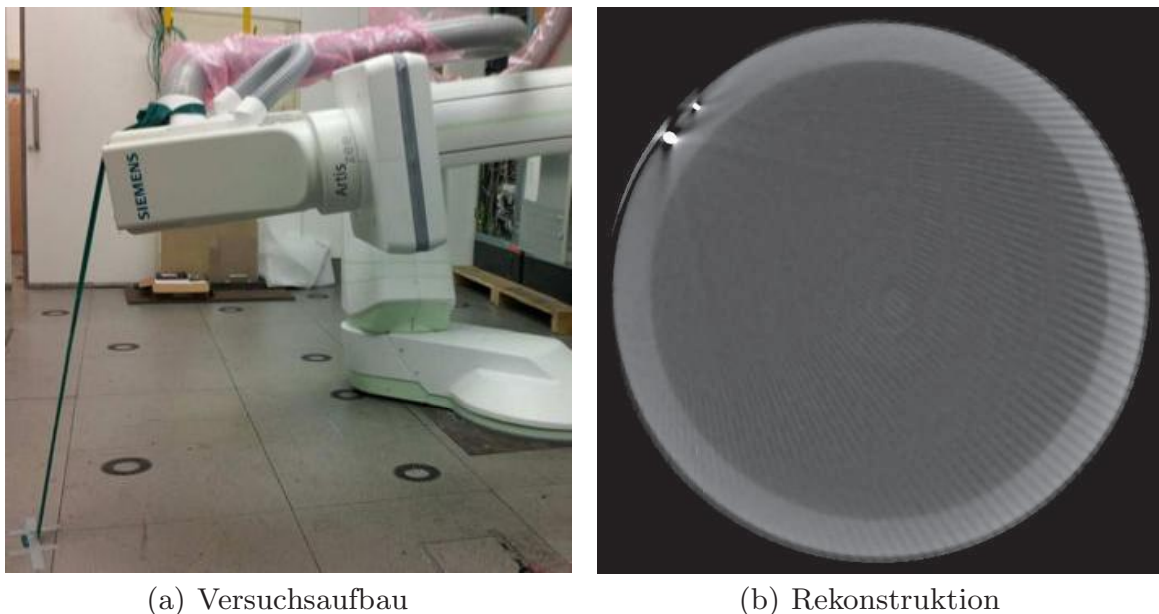
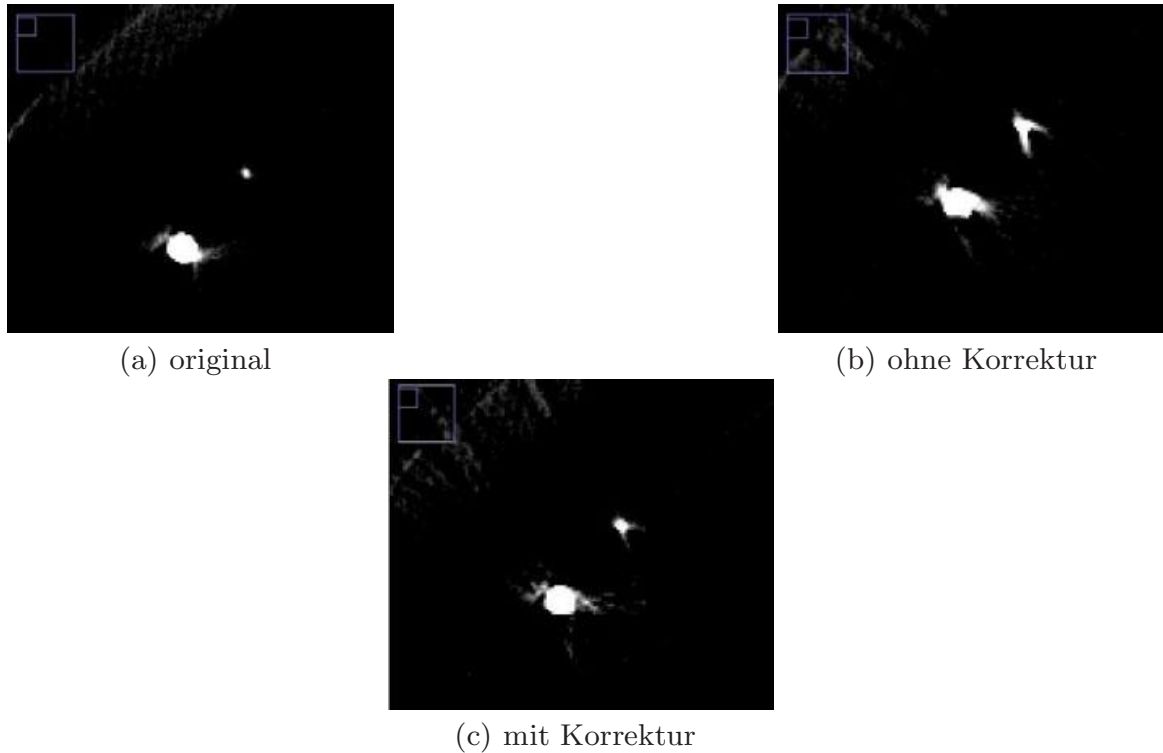


Abb. 1. Versuchsaufbau zum Generieren der Störfahrten und Rekonstruktion der Fahrt 13 mit originalen Projektionsmatrizen.

Abb. 2. Hochkontrastrekonstruktionen von störbehafteter 3D-Fahrt mit verschiedenen Projektionsmatrizen.



4 Diskussion

In Zukunft kann darüber nachgedacht werden, bei den Geometriekalibrierungen synchron die Odometriekurven aufzunehmen und in einer Datenbank abzulegen. Treten bei 3D-Fahrten dann Abweichungen auf, die die Rekonstruktion verfälschen, können die Projektionsmatrizen automatisch angepasst werden. Dadurch würde sich eine erhebliche Verbesserung der Genauigkeit beim letztendlichen Einsatzort des Röntgengerätes ergeben. Die Fehlerreduktion von 30.7% ist trotz der geringen Datenbankgröße vielversprechend. Bei den gezeigten Ergebnissen handelt es sich um einen Forschungsprototypen und kein klinisches Produkt.

Literaturverzeichnis

1. Siemens. Sinumerik 840d sI: Funktionsbeschreibung. Erlangen: Siemens AG Industry; 2006.
2. Hoppe S. Accurate Cone-Beam Image Reconstruction in C-Arm Computed Tomography. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg; 2009.
3. Maier A, Choi JH, Keil A, et al. Analysis of vertical and horizontal circular C-arm trajectories. Proc SPIE. 2011; p. 7961231–38.
4. Schwarz HR, Köckler N. Numerische Mathematik. Wiesbaden: Vieweg Teubner; 2011.