

Digitale Bildverarbeitung in der Röhreninspektion

Bei der Inspektion von Abwasser- und Frischwasserröhren wird seit gut einem Jahrzehnt auf die Hilfe von fahrbaren Kanalrobotern mit aufgesetzter Videokamera gesetzt. Während früher die Videobilder nur manuell ausgewertet wurden, so kommen heute Methoden der digitalen Bildverarbeitung zum Zuge. Wir beschreiben in unserem Artikel sowohl einen Verarbeitungsschritt zur Erstellung einer Innenwandabwicklung der Röhre als auch einen Analyseschritt zur automatischen Detektierung von Rohrmuffen. Die Erkennungsrate bei den Rohrmuffen hängt wesentlich von der Qualität der Innenwandabwicklung ab. Unsere Algorithmen erreichen auf einem herkömmlichen PC eine Erkennungsrate von ca. 99% bei einer Geschwindigkeit von mehr als drei Metern pro Sekunde.

Martin Schindler, Christoph Stamm | martin.schindler@fhnw.ch

In einer typischen, europäischen Stadt wird ein im Untergrund liegendes Röhrensystem für Frisch- und Abwasser eingesetzt. Ein solches Rohrleitungsnetz muss periodisch (ca. alle 8 Jahre) auf kleinere und grössere Schäden untersucht werden, um einerseits eine unerwünschte Versickerung von Frischwasser und andererseits eine gefährliche Kontaminierung des Frischwassers durch in die Röhren eindringende Fremdstoffe zu vermeiden. Solche regelmässigen Inspektionen des Rohrleitungsnetzes sind eine zeitaufwändige und daher auch kostspielige Aufgabe. Um besser verstehen zu können, welcher Aufwand damit verbunden ist, betrachten wir hier beispielsweise die Stadt Zürich. Das Abwassereinzugsgebiet von Zürich (und ein paar weniger benachbarter Gemeinden) umfasst gut 59 Quadratkilometer Bauzone und beherbergt rund 390'000 Einwohner. Die Gesamtlänge der öffentlichen Abwasserkanäle in diesem Gebiet ist 925 Kilometer. Dazu kommen private Leitungen von total 3'051 Kilometern [Neu07].

Bereits seit zehn Jahren wird bei der Inspektion auf die Hilfe von fahrbaren Kanalrobotern mit aufgesetzter Videokamera gesetzt. Sind früher die Videodaten in einem Begleitfahrzeug auf VHS-Bändern aufgezeichnet und von Sachverständigen begutachtet worden, so geht der Trend heute deutlich in Richtung der automatisierten Schadensdetektion mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung.

Die Firma CDLab AG in Murten (Schweiz) [CD-Lab] gehört zu den weltweit führenden Anbietern von Röhreninspektions-Software. In einem von der KTI (Förderagentur für Innovation des Bundes) finanziell unterstützten einjährigen Projekt¹ haben Mitarbeiter der CDLab zusammen mit Angehörigen des Instituts für Mobile und Verteilte Systeme der Fachhochschule Nordwestschweiz die Röhreninspektions-Software in einzelnen Teilen

wesentlich verbessert und um eine automatische Rohrmuffenerkennung erweitert.

Digitale Röhreninspektion

Auf einem Kanalroboter befindet sich eine analoge Videokamera mit einer Fischaugoptik. Die analogen Videodaten werden über ein Kabel zum Begleitfahrzeug gesendet und dort mit Hilfe von zusätzlicher Hardware digitalisiert. Diese digitalisierten Rohdaten der Fischaugansicht werden dann von der Röhreninspektions-Software in eine entsprechende Innenwandabwicklung transformiert (Abb. 1). Dabei werden in regelmässigen Abständen von der Fischaugansicht ringförmige Bilder von schmalen Rohrabschnitten extrahiert, diese zu Bildstreifen transformiert, und die Streifen schliesslich durch Aneinanderreihen in eine kontinuierliche Innenwandabwicklung der Röhre überführt. Im Gegensatz zur bisherigen, analogen Inspektionstechnik erlaubt diese Darstellung der Innenwandabwicklung einen rascheren Überblick über den Leitungszustand eines kompletten Rohrabschnittes und ein einfacheres Ausmessen von Objekten und Schäden.

Erstellung der Innenwandabwicklung

Der Kanalroboter ist über verschiedene Kabel (Strom/Video), welche über eine Kabeltrommel laufen, mit der Hardware zur Analog/Digital-Wandlung verbunden (Abb. 2). Anhand der Länge des abgewickelten Kabels lässt sich an der Kabeltrommel die zurückgelegte Distanz des Kanalroboters ungefähr ablesen. Die zurückgelegte Distanz wird benötigt, um alle paar Zentimeter aus den Halbbildern des PAL-Videosignals ein digitales Gesamtbild (Fischaugansicht) zu erstellen. Aus dieser Fischaugansicht wird ein ringförmiger Bereich entnommen und in eine rechteckige Zy-

¹ KTI-Projektnummer: 7785.2 ESPP-ES

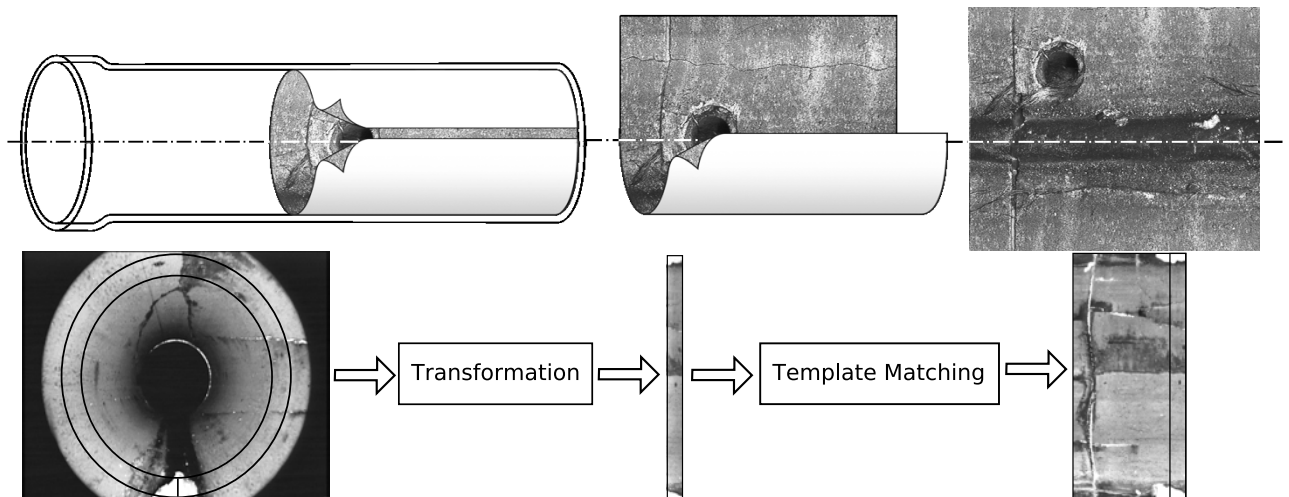


Abb. 1: Vom Fischaugbild zur Innenwandabwicklungsansicht

linderprojektion (Streifen) umgerechnet. Da die Messung der zurückgelegten Distanz an der Kabeltrommel relativ ungenau ist, entstehen ungleiche Abstände zwischen den Streifen. Zudem wird der ringförmige Bereich immer an derselben Position des Gesamtbildes entnommen, was zu Verzerrungen in der Abwicklungsansicht führen kann, sollte der Roboter sich nicht exakt parallel zur Röhre bewegen. Eine korrekte, entzerrte Abwicklungsansicht ist aber eine wichtige Voraussetzung für eine möglichst fehlerfreie, automatische Detektierung und Vermessung von Strukturen im Rohr. Eine falsche Aneinanderreihung der Streifen könnte zu fehlenden oder mehrfach abgebildeten Strukturen führen.

Ein weiteres Problem ist die starke Helligkeitsabnahme (bis zu 40% auf nur wenigen Zentimetern) beim Fischaugbild in Richtung des Bildzentrums. Solche Helligkeitsunterschiede müssen so gut wie möglich korrigiert werden, damit die resultierenden, starken Helligkeitssprünge an den

Streifenrändern nicht fälschlicherweise als Rohrmuffen detektiert werden.

Eine erste Möglichkeit, die Streifen korrekt zu einer Innenwandansicht zusammensetzen, besteht darin, die Lage des Roboters in der Röhre genau zu bestimmen, und dadurch den passenden Bereich des Fischaugbildes in den entsprechenden Streifen zu transformieren. Die so gewonnen Streifenbilder könnten dann ohne weitere Bearbeitung zu einer korrekten Abwicklungsansicht aneinandergefügt werden. Die exakte Positions- und Lagebestimmung des Roboters innerhalb der Röhre erfordert jedoch Anpassungen am Roboter und ist somit nicht direkter Gegenstand dieses Projektes. Allerdings besteht eine Möglichkeit, zumindest die Geschwindigkeit und damit die zurückgelegte Distanz des Roboters nur mit Hilfe des Videobildes zu bestimmen und zwar unter Ausnutzung der ansonsten störenden Interlacing-Effekte der PAL-Videobilder. Dieser Ansatz ist in [Wäl07] untersucht worden. Die Geschwindigkeit direkt an

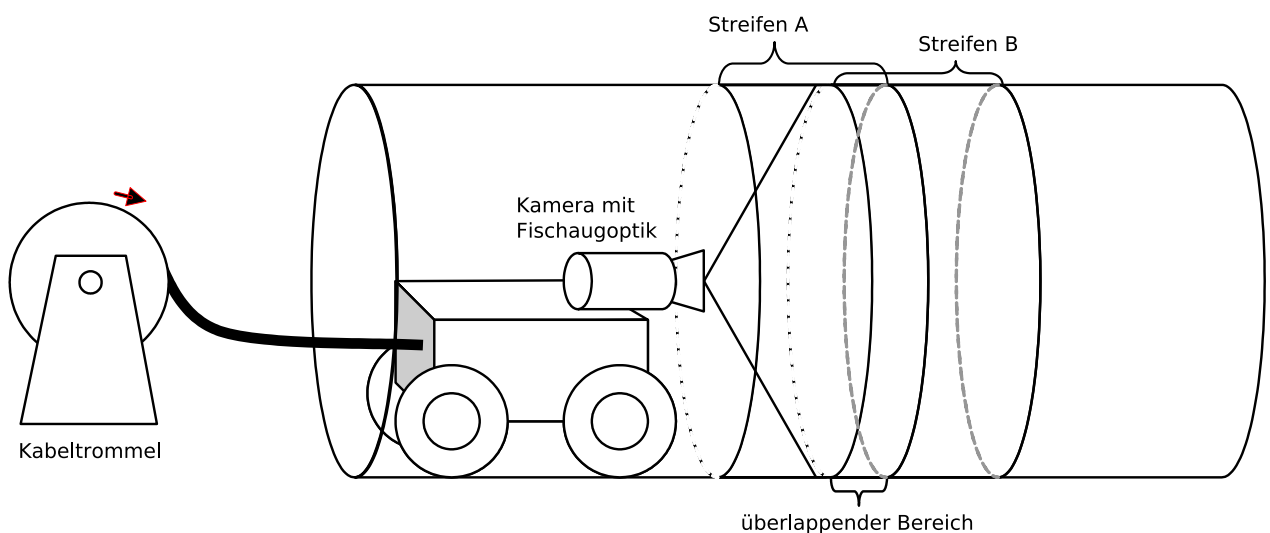


Abb. 2: Überlappung der einzelnen Streifen

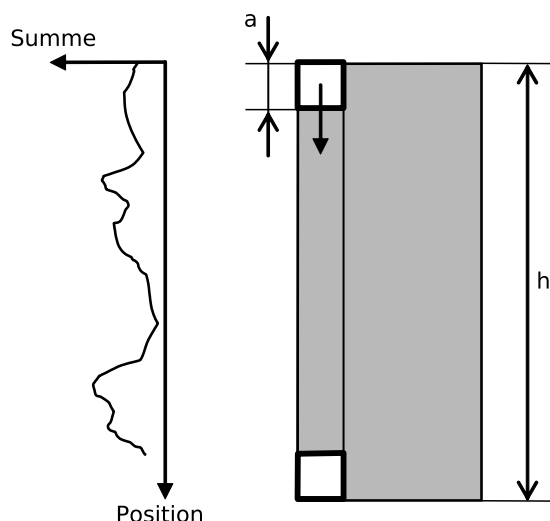


Abb. 3: Erzeugung des Kontrasthistogramms

den Rädern des Roboters zu messen, kann infolge des Durchdrehens der Räder in glitschigen Passagen zu falschen Ergebnissen führen.

Eine zweite und von uns favorisierte Möglichkeit besteht darin, die ungenau transformierten Streifen mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung so gut wie möglich zu einer Innenwandabwicklung zusammenzusetzen. Da zwei aufeinander folgende Streifen einen überlappenden Bereich haben (Abb. 2), können diese mit Hilfe eines Template-Matching-Verfahrens zusammengesetzt werden.

Unter Template-Matching wird der Vergleich eines Suchbildes (Template) mit einem gleich grossen Bildbereich verstanden [WikiPM]. Für jede mögliche Position des Suchbildes innerhalb des Bildes wird die Ähnlichkeit bzw. der Grad der Übereinstimmung zwischen dem Suchbild und dem korrespondierenden Bildbereich ermittelt. Als Mass für die Ähnlichkeit kann zum Beispiel die Summe der quadratischen Differenzen verwendet werden. Da die einzelnen Streifen über eine gegenseitige, schmale Überlappung verfügen, lässt sich durch Anwendung des Template-Matching-Verfahrens ein optisches Flussfeld zwischen Bildpunkten am rechten Rand des linken Streifens und Bildpunkten am linken Rand des benachbarten rechten Streifens berechnen. Dabei wird der rechte Rand des linken Streifens zum Suchbereich und Teile des linken Randes des rechten Streifens zum Suchbild. Somit kennen wir für Randpixel von benachbarten Streifen zusätzlich einen Verschiebungsvektor. Mit Hilfe dieses Flussfeldes können die benachbarten Streifen anschliessend punktweise transformiert und nahtlos aneinander gereiht werden. Gleichzeitig können auch Helligkeitsunterschiede zwischen benachbarten Streifen ausgeglichen werden.

Die Auswahl der Suchbilder ist entscheidend für ein erfolgreiches Matching. Bildbereiche mit

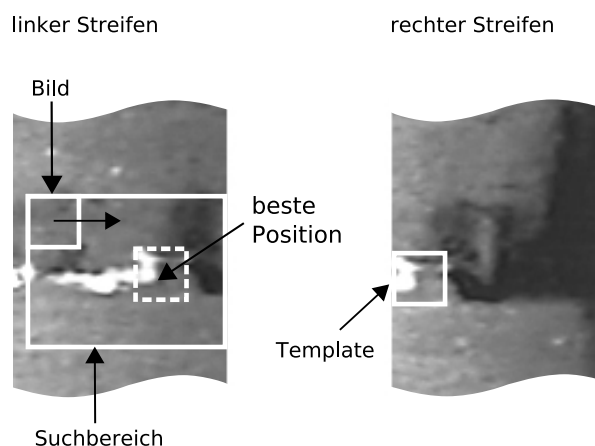


Abb. 4: Template mit entsprechendem Suchbereich

wenig oder gar keinem Kontrast, zum Beispiel neue PVC-Röhren ohne Ablagerungen oder Rohrbereiche unter Wasser, sind oft ungeeignet für ein erfolgreiches Matching. Um geeignete Suchbilder zu finden, werden die ersten paar Pixelspalten des rechten Streifens mit einem Sobel-Filter [WikiSob] auf Kanten untersucht und anschliessend ein Kontrasthistogramm erstellt, indem alle Kantenpixel innerhalb der möglichen Suchbildflächen gezählt werden (Abb. 3). So erhält man zu $h - a + 1$ Positionen einen Summenwert, wobei h der Bildhöhe und a der Höhe des Suchbildes entsprechen.

Aus diesem Kontrasthistogramm lassen sich die Suchbilder mit dem stärksten Kontrast herauslesen. Zu jedem dieser Suchbilder (Template) wird nun ein eingeschränkter, lokaler Suchbereich im linken, benachbarten Streifen definiert (Abb. 4). Die Breite des Suchbereichs ist direkt abhängig von der Breite der Streifenüberlappung. Die Abweichungen in vertikaler Richtung sind wesentlich kleiner als die horizontalen Verschiebungen, deshalb kann der Suchbereich in vertikaler Richtung kleiner gewählt werden.

Ausgehend vom Suchbild und dem entsprechenden Suchbereich gilt es nun eine Position zu finden, bei der die Korrelation zwischen Suchbild und einem gleich grossen Bildbereich innerhalb des Suchbereichs maximal ist. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten: Wie bereits erwähnt, können die Summen der absoluten oder quadratischen Differenzen zwischen Bildbereich und Suchbild berechnet werden, was zwar sehr einfach und schnell ist, aber hier nicht geeignet, da Unterschiede in der Helligkeit zwischen Bildbereich und Suchbild zu unnötig schlechten Korrelationen führen. Was wir brauchen ist ein Mass, welches invariant gegenüber linearen Helligkeitsänderungen ist. Der Korrelationskoeffizient $Kor(S, T)$ erfüllt diese Bedingung,

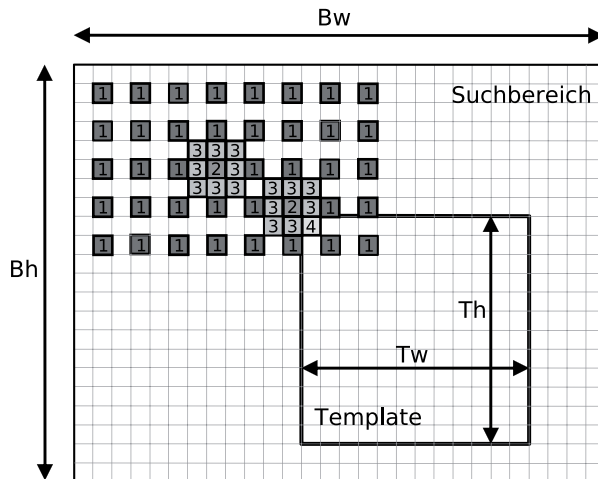


Abb. 5: Reduziertes Suchverfahren

$$\text{Kor}(S, T) = \frac{\text{Cov}(S, T)}{\sqrt{\text{Var}(S) \cdot \text{Var}(T)}} = \frac{n \sum_{i=1}^n s_i t_i - \sum_{i=1}^n t_i \cdot \sum_{i=1}^n s_i}{\sqrt{\left(n \sum_{i=1}^n (s_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n s_i \right)^2 \right) \cdot \left(n \sum_{i=1}^n (t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2 \right)}}$$

wobei S dem Suchbereich [s₁..s_n] und T dem Template (Suchbild) [t₁..t_n] entsprechen. Er nimmt Werte zwischen -1 und +1 an. Bei einem Absolutwert von eins besteht ein vollständig linearer Zusammenhang zwischen Suchbereich und Suchbild. Ist der Korrelationskoeffizient null, so gibt es keinen linearen Zusammenhang.

Der Aufwand der Berechnung des Korrelationskoeffizienten Kor(S, T) ist linear in der Anzahl Bildpunkte n des Suchbildes. Somit ergibt sich ein Gesamtaufwand für ein Template-Matching mit einem Suchbereich bestehend aus m Bildpunkten in der Grössenordnung von O(n m). Das heisst, mit einer Halbierung des Suchbereichs halbiert sich auch der Rechenaufwand. Da es sich bei unseren Bilddaten um natürliche Bilder handelt, darf davon ausgegangen werden, dass der unmittelbare Nachbar der besten Position auch eine hohe Korrelation hat. Somit ist es möglich, nur für jede zweite Position innerhalb des Suchbereichs den Korrelationskoeffizienten zu berechnen und anschliessend lokal (in einer 3x3-Umgebung) um die zwei besten Positionen herum, den vermeintlich höchsten Korrelationswert und somit die beste Position mit höchster Übereinstimmung zu finden (Abb. 5).

Dieses Template-Matching-Verfahren wird auf alle zuvor selektierten Suchbilder angewendet.

Dadurch erhalten wir zu jedem Template ein entsprechendes Bild im Suchbereich und somit die gesuchten Verschiebungsvektoren (Abb. 6a). Diese Verschiebungsvektoren bilden dann die Stützwerte des optischen Flussfeldes. Um eine möglichst gute Qualität bei der Aneinanderreihung der Streifen zu gewährleisten, werden allfällige Ausreisser unter den Verschiebungsvektoren vorgängig entfernt. Wir definieren dazu drei Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit ein Verschiebungsvektor als gültig klassifiziert wird: Der Absolutwert des Korrelationskoeffizienten muss mindestens 0.9 betragen, die Abweichung eines einzelnen Vektors zum Durchschnitt aller Vektoren darf höchstens 15 Bildpunkte und der Abstand zu einem direkten Nachbarvektor darf höchstens 5 Bildpunkte betragen. Diese Werte haben wir anhand verschiedener Testreihen empirisch ermittelt.

Nach Bestimmung des optischen Flussfeldes zwischen zwei benachbarten Streifen wird dieses auf den rechten Streifen angewendet (Abb. 6b), so dass sich dieser nahtlos an den vorangehenden, linken Streifen anfügen lässt. In einem letzten Schritt werden dann noch die Helligkeitsunterschiede zwischen den beiden Streifen ausgeglichen (Abb. 6c).

Rohrmuffenerkennung

Eine automatische Detektierung von Rohrverbindungen (Rohrmuffen) dient vorwiegend der schnelleren Beurteilung des Bildmaterials über allfällige Röhrenschäden. Da vor allem Muffen schadenanfällig sind, müssen diese zwingend untersucht werden. Sind die genauen Positionen der Muffen bekannt, so kann der Inspekteur per Mausklick direkt zur nächsten Muffe springen und somit den weniger interessanten Zwischenteil überspringen und damit Zeit gewinnen. Zudem gibt es auch Vorschriften, welche ein Bildprotokoll von sämtlichen Muffen verlangen.

Wenn wir davon ausgehen, dass der Kanalroboter genau parallel und zentral ein Rohr abfährt, so sind Rohrmuffen in einer korrekten Innenwandansicht als klar hervortretende Linien erkennbar (Abb. 7a). Wie bereits angedeutet, fährt der Kanalroboter aber keineswegs immer parallel zum Röhrenverlauf, was zu sinusförmig geschwungenen Ansichten von Muffen führt (Abb. 7b/c). In manchen Situationen sind die Muffen zudem nicht als durchgehende Linien erkennbar, da Rohrverschmutzungen die Linienstruktur überschatten. Eine automatische Muffenerkennung muss mit diesen Schwierigkeiten umgehen können. In einer anderen Diplomarbeit [Man07] ist wiederum mit zusätzlicher Roboter-Hardware – drei fest aufgesetzten Lasermodulen – der Rohrdurchmesser auf wenige Millimeter genau ermittelt worden, was ausreicht, um die leichte Durchmesseränderung

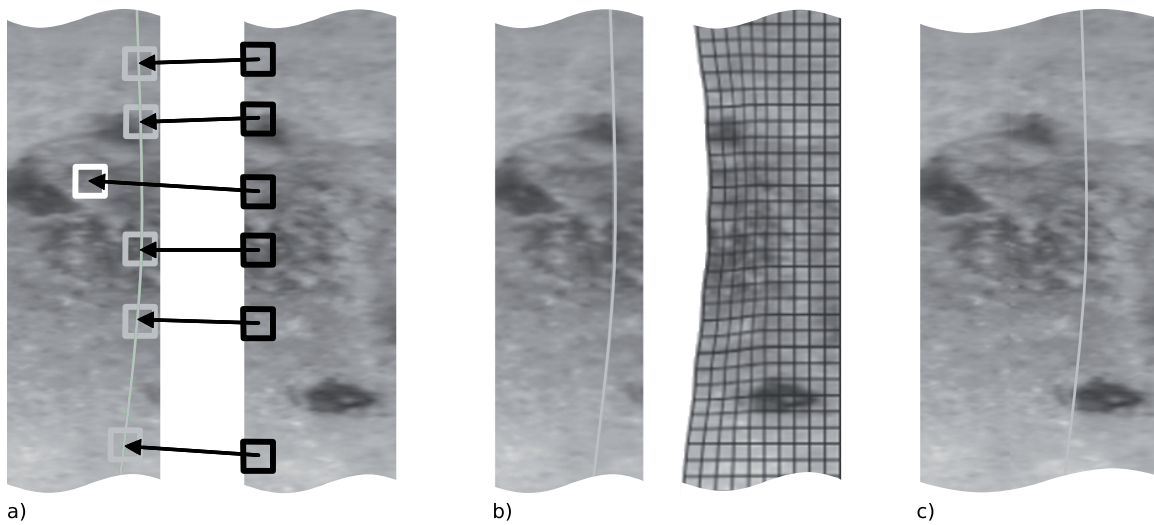


Abb. 6: a) Verschiebungsvektoren b) optisches Flussfeld c) Innenwandabwicklung

bei Rohrmuffen hinreichend genau zu erkennen. In unserem Projekt sind wir wiederum von einem Standard-Kanalroboter ohne Laser-Module ausgegangen. Das heisst, wir haben nur mit einfachen Mitteln der digitalen Bildanalyse der zuvor erstellten Innenwandansichten eine automatische Muffenerkennung realisiert.

Das Grundprinzip unserer Erkennungsmethode basiert auf der Erkennung von vertikal verlaufenden Strukturen und dem Zählen von Bildpunkten in vertikalen Kanten (Kantenpixel) pro Bildspalte. Damit nur die vertikalen Kanten sichtbar werden, wird wiederum ein Sobel-Filter eingesetzt. Das gefilterte Bild wird zudem mit Hilfe einer Schwellwertfunktion auf ein Schwarzweissbild reduziert. Weil es aber in Röhren noch andere Objekte mit vertikalen Strukturen gibt, müssen weitere, heuristische Nebenbedingungen erfüllt werden, wie zum Beispiel die Verteilung der Kantenpixel.

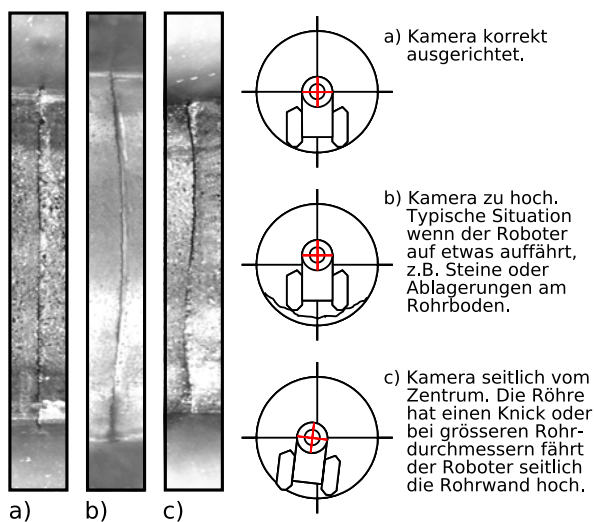


Abb. 7: Ursache der sinusförmigen Rohrmuffen

Da ein aufgenommener Röhrenabschnitt oft mehrere hundert Meter lang sein kann, wird die erstellte Innenwandansicht oft mehrere 1000 Pixel breit. Solch grosse Bilder lassen sich nur mit erheblichem Speicheraufwand verarbeiten und werden daher vorgängig in sich überlappende Einzelbilder mit vorgegebener Breite unterteilt (Abb. 8). Die Überlappung dient dazu, dass Muffen, welche auf einem Einzelbild nur teilweise sichtbar, auf dem nächsten Einzelbild vollständig ersichtlich sind.

Für jedes Einzelbild wird ein rechteckiges Fenster, welches über die gesamte Bildhöhe geht, von links nach rechts über das Bild verschoben und zu jeder Fensterposition die Anzahl Kantenpixel gezählt, die sich innerhalb des Fensters befinden (Abb. 9). Das Fenster muss genügend breit sein, damit auch Muffen, welche nicht genau senkrecht im Bild liegen, möglichst gut erkannt werden. Auf der andern Seite, sollte das Fenster nicht zu breit sein, um hauptsächlich lineare, vertikale Strukturen ausfindig zu machen. Aus den ermittelten Summen der Kantenpixel werden die lokalen Maxima ausgewählt und als potentielle Muffenpositionen selektiert. Damit Muffen von anderen Objekten, welche ebenfalls vertikale Kanten haben, z.B. Wasserrinnen eines seitlichen Rohreinlaufs, unterschieden werden können, bedarf es oft weiterer heuristischer Selektionen. In einem ersten Schritt überprüfen wir, ob die potentielle Muffe durchgängig ist, d.h. ob es zwischen den einzelnen Kantenpixel keine grösseren vertikalen Unterbrüche gibt. Falls dem so ist, dann überprüfen wir in einem zweiten Schritt ob, diese Kantenpixel gleichmässig über die gesamte Bildhöhe verteilt sind. Dazu wird der Mittelwert der vertikalen Positionen pro Fenster berechnet. Falls sich dieser Mittelwert stark von der halben Höhe des Bildes unterscheidet, dann ist es wahrscheinlich keine Muffe.

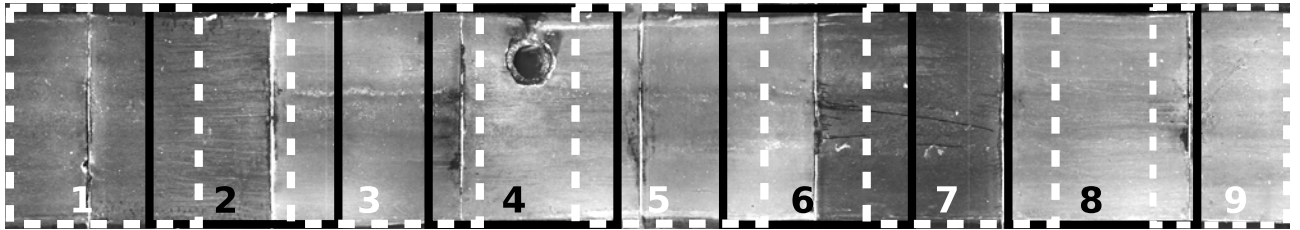


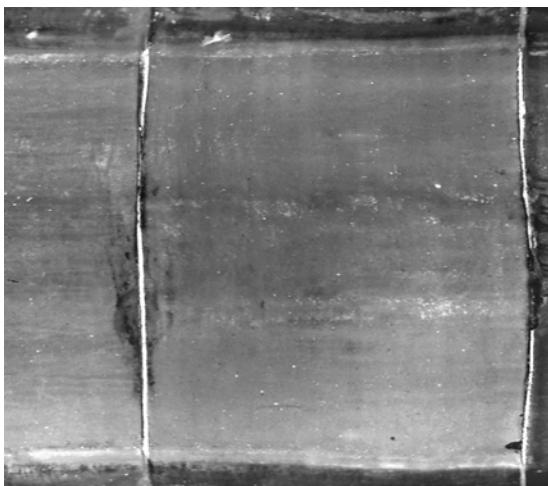
Abb. 8: Aufteilung der Bilder der Innenwandansicht

Nachdem die Rohrmuffen zumindest teilweise erkannt worden sind, werden sinusförmig geschwungene Muffen zusätzlich begradigt, um ein möglichst genaues Abbild der Realität zu erhalten. Bei der Begradigung wird eine auf die Muffe interpolierte Sinuskurve benötigt. Da bekannt ist, dass es sich bei den sinusförmig geschwungenen Muffen um genau eine Periode einer Sinusschwingung handelt, müssen nur die Phasenverschiebung, die Amplitude und der Abstand zum Bildrand berechnet werden. Dazu betrachten wir die einzelnen Kantenpixel als lineares Signal im Bildraum, so dass mittels eindimensionaler Fourieranalyse diese drei Parameter berechnet werden können. Den Abstand zum Bildrand erhält man direkt aus der ersten Frequenzkomponente. Die Phasenverschiebung und die Amplitude werden in der zweiten Frequenzkomponente abgebildet. Daher werden alle Frequenzen bis auf die ersten beiden auf null gesetzt und anschliessend mit der inversen

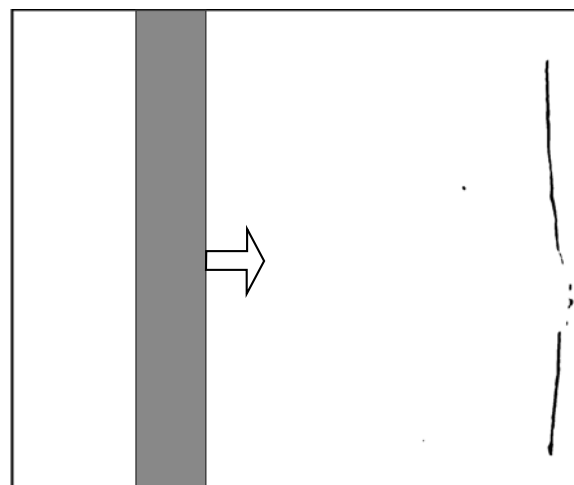
Fouriertransformation wieder in ein Bildsignal transformiert. Das Resultat ist eine interpolierte Sinuskurve über der Muffe (Abb. 10b). In einem von der Amplitude des Signals abhängigen Fenster werden die Pixel so gestreckt oder gestaucht, dass die Muffe eine vertikale Gerade bildet (Abb. 10c/d).

Einsatz und Ausblick

Wir haben ein erstes heuristisches Verfahren zur Erstellung von Rohrinne wandansichten und ein zweites zur Erkennung von Rohrmuffen entwickelt. Die entwickelten Algorithmen für das korrekte Zusammensetzen der einzelnen Bildstreifen zu einer Innenwandansicht haben eine hohe Effizienz, so dass das Zusammensetzen der Bilder noch während der Rückfahrt des Roboters aus der Kanalröhre geschehen kann. Die Erkennung von Muffen ist zeitaufwändiger und erfolgt üblicherweise erst in einem nachgeschalteten Post-Pro-



a)



b)

Abb. 9: Kantenbild der Innenwandansicht mit zwei Rohrmuffen

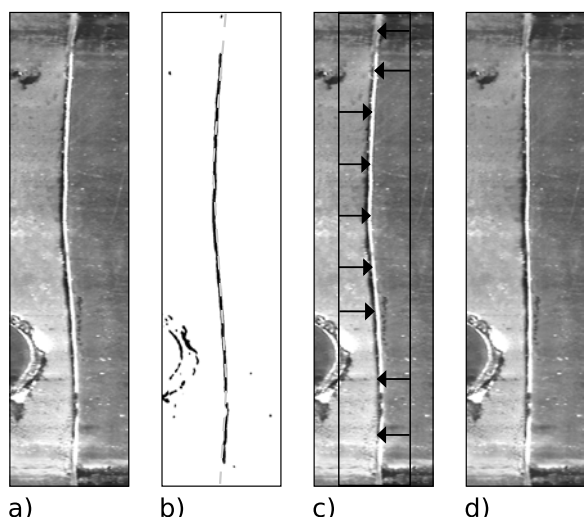


Abb. 10: Begradigung einer Rohrmuffe

cessing. Mit Hilfe unserer neu entwickelten Algorithmen, lassen sich auf einem herkömmlichen Personalcomputer (Pentium 4 Prozessor, 3GHz) Innenwandansichten von Röhren mit einer Geschwindigkeit von ca. 3.5 Meter pro Sekunde auf Muffen untersuchen. Bei Tests von 28 unterschiedlichen Röhrenabschnitten mit einer Gesamtlänge von 860 Metern und insgesamt 667 Muffen, haben unsere Algorithmen 660 Muffen korrekt erkannt und sieben Strukturen fälschlicherweise als Muffe deklariert. Dies entspricht einer Erkennungsrate von ca. 99%.

In diesem KTI-Projekt wurde auch ein erster Ansatz zur automatischen Erkennung von seitlichen Rohreinläufen entwickelt. Die Erkennungsrate von Rohreinläufen liegt momentan noch bei weniger als 70%. Ein Hauptgrund für diesen schlechten Wert liegt im momentanen Algorithmus, der nur runde Objekte erkennt, die Rohreinläufe aber bedingt durch deren Anschlusswinkel und Zustand eine andere Form aufweisen. Deshalb ist die Erkennung von Rohreinläufen auch ein wichtiges Thema im Nachfolgeprojekt.

Referenzen

- [CDLab] Kanalinspektion mit WinCan, <http://www.wincan.com>
- [Man07] Mancktelow M., Image Processing in Pipe Inspection, Diplomarbeit Studiengang Informatik, Fachhochschule FHNW, 2007, <http://www.fhnw.ch/personen/marcus.hudritsch>
- [Neu07] Neuhold G., Sanierung der Abwasserhältnisse Zürich-Nord (SAN), ERZ, 2007, http://www.stadt-zuerich.ch/internet/erz/home/.../Artikel_SAN_032007.pdf
- [Wäl07] Wälchli Y., Image Processing in Pipe Inspection. Diplomarbeit Studiengang Informatik, Fachhochschule FHNW, 2007, <http://www.fhnw.ch/personen/marcus.hudritsch>
- [WikiPM] Wikipedia, Pattern Matching, Mai 2007, http://de.wikipedia.org/wiki/Pattern_Matching
- [WikiSob] Wikipedia, Sobel-Operator, <http://de.wikipedia.org/wiki/Sobel-Operator>