COMPUTER VISION FÜR DIE CFK-PRODUKTION: AUTONOMES GREIFEN VON INDIVIDUELLEN PREFORMS

A. Schuster, T. Schmidt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.,
Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie mit einem Industrieroboter biegeschlaffe Carbonfaser-Halbzeuge mit stets veränderlichen Geometrien automatisiert zu Bauteilen verarbeitet werden können. Es wird ein System aus Industrieroboter, Greifer und Bildverarbeitungssystem vorgestellt und hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeiten sowohl in der Positionsbestimmung als auch im Greifen und Ablegen quantifiziert. Zum derzeitigen Stand kann klar festgestellt werden, dass unter optimalen Bedingungen eine Gesamtgenauigkeit im Bereich von σ=0,2 mm Standardabweichung erreicht werden kann; bei schlechten Bedingungen arbeitet das System weiterhin sauber und überaus robust, wobei die Genauigkeit im Bereich von 1-2 mm liegt. Da diese Genauigkeiten für zwei relevante Use-Cases (Generisches Thermoplast-Organoblech und Stringerbase-Preform aus Biax-Trockengelege) mehr als ausreichend ist, wurden Testbauteile automatisiert hergestellt und qualifiziert.

1 EINLEITUNG

1.1 Situation in der Luft- und Raumfahrt

Seit den 1950er Jahren werden Carbonfaserverstärkte Kunststoffe für Strukturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt in ständig expandierenden Anwendungsgebieten eingesetzt. Die Herstellverfahren sind vielfältig und gut erforscht, weisen jedoch jenseits einiger besonderer Anwendungen wie etwa Tapelegen, Wickeln oder Pultrusion meist geringen Automatisierungsgrad auf. Die gestiegenen Anforderungen an das Strukturgewicht in der zivilen Luftfahrt führt zusammen mit den erforderlichen Stückzahlen zu einem gesteigerten Bedarf an innovativen Produktionstechnologien für Carbonfaserverstärkte Kunststoffe. Im Gegensatz zu Anwendungen in der Automobilindustrie sind die erforderlichen Stückzahlen gering und die Bauteile oft vergleichsweise groß. Endkonturnahe Thermoplast-Organbleche und in Infiltrationsverfahren hergestellte Duromerbauteile zeichnen sich durch einen komplexen Lagenaufbau mit hunderten von ähnlichen, aber nicht exakt gleichen Zuschnitten aus. Die manuelle Bauteilerstellung erfordert ein hohes Maß an Präzision bezüglich der Ablage und häufig ergeben sich Probleme bei der Handhabung von sehr großen Zuschnitten. Um diese Herstellverfahren zu automatisieren wird ein flexibles und anpassungsfähiges System benötigt, das gleichzeitig in seiner Funktionsweise robust ist. Ein gängiger Weg zur kosteneffizienten Automatisierung ist der Einsatz von Industrierobotern, der allerdings überwiegend auf die Handhabung biegesteifer Materialien und stets wiederkehrende Produktionsabläufe beschränkt ist. Am DLR Zentrum für Leichtbau-Produktonstechnologie in Augsburg wird die Kombination aus Industrieroboter und Bildverarbeitungssystem untersucht mit dem Ziel ein System zu schaffen, das ohne Teachen des Roboters komplexe Lagenaufbauten aus biegeschlaffem Material von veränderlicher Geometrie automatisiert erstellen kann. Die Anbindung an das CAx-System sorgt dabei für eine durchgängige Automatisierung und eliminiert die Notwendigkeit, den Roboter manuell zu teachen.

1.2 Autonomes Greifen und Zuschnittserkennung

Ein wichtiger Aspekt bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen ist die optimale Formgebung der 2D-Zuschnitte um eine möglichst gute Annäherung an die später gewünschte 3D-Form zu erhalten. Das Mittel der Wahl ist hierbei die Durchführung einer Drapiersimulation auf Basis der CAD-Daten, was im Regelfall zu nicht rechteckigen Zuschnitten führt. Da die Zuschnitte im weiteren Prozess für die positionsgenaue Ablage zunächst auch positionsgenau gegriffen werden müssen, entsteht bei der Verwendung von lediglich mit Greifern ausgestatteten Robotern erheblicher Aufwand, um die Zuschnitte in korrekter Ausrichtung an eine vordefinierte Greifposition zu bringen. Ein Zugewinn an Produktivität kann nicht erreicht werden, wenn dem automatischen Greifen und Ablegen manuelle Ausrichtarbeiten vorausgehen, die den Ablauf zeitlich einschränken. Dem Roboter muss also die Fähigkeit verliehen werden, das zu greifende Material auch wahrzunehmen (Abb. 1, Abb. 8).

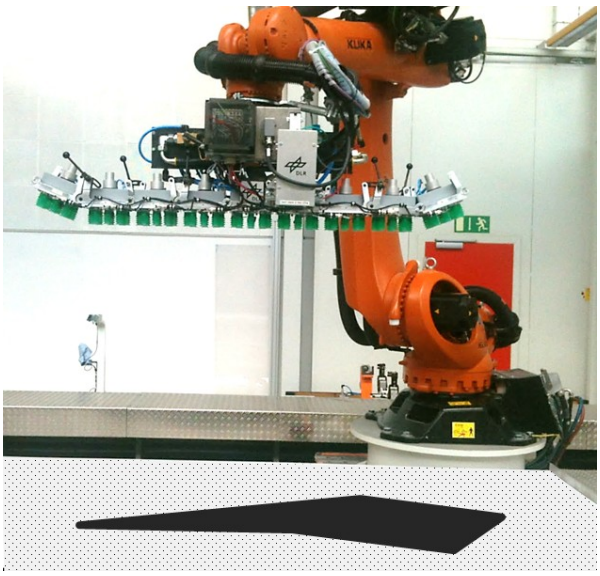

Abbildung 1: System zum autonomen Greifen und Ablegen von Zuschnitten aus Carbonfasermaterial

Der Einsatz von Bildverarbeitungssystemen kann hier Abhilfe schaffen: Die aus der Drapiersimulation bekannten 2D-Konturen werden benutzt, um eine digitale Repräsentation der Zuschnittsform in der zur verwendeten Kamera passenden Auflösung zu erstellen. Die entstehende Bitmap wird mit dem Kamerabild abgeglichen, wodurch Koordinaten und Drehwinkel der im Blickfeld der Kamera beliebig platzierten Zuschnitte bestimmt werden. Nach der Transformation der Koordinaten ins Robotersystem können die Zuschnitte ohne weitere Interaktion des Benutzers gegriffen und an die korrekten 3D-Positionen abgelegt werden. Der Roboter kann somit Zuschnitte, die lediglich grob eingebracht wurden, korrekt aufnehmen und weiterverarbeiten, wodurch bei der Materialversorgung Zeit eingespart und das Verfahren deutlich vereinfacht werden kann.

2 BILDVERARBEITUNG IN DER CFK-PRODUKTION

2.1 Anforderungen an das System

An ein industrietaugliches Bildverarbeitungssystem für den Einsatz in einer automatisierten CFK-Produktion auf der Basis von Industrierobotern sind verschiedene generelle Anforderungen zu stellen: Neben der Eigenschaft, den Arbeitsraum des Roboters nicht einzuschränken, muss das System robust und staubdicht sein, um nicht durch die leitfähigen Carbonfasern beeinträchtigt oder sogar durch Kurzschluss zerstört zu werden. Durch die Anforderungen bezüglich des Arbeitsraums wurde beschlossen, das System am Robotergreifer zu montieren, was zusammen mit der sinnvoll erscheinenden Maximalgröße von $\approx$ 1,5 m x 2,0 m für Zuschnitte und dem aus der Roboterpose ableitbaren Arbeitsabstand von $\leq$ 1 m zu einem relativ weiten Blickwinkel von ca. $\pm$ 90 $^\circ$ führt. Das System muss ferner unabhängig vom Umgebungslicht operieren und darf nicht anfällig gegen die für CFK-Halbzeuge typischen Spiegelungen sein. Neben diesen eher allgemeinen Anforderungen sollte die Detektionsrate bei Vorhandensein des Zuschnitts (richtig positive Klassifizierung) bei $\geq$ 99 $\%$ sowie bei nicht Vorhandensein des Zuschnitts (falsch positive Klassifizierung) $\leq 10^{-6}$ sein. Die sehr strenge Anforderung für die irrtümlich positive Detektion gründet sich in der Tatsache, dass ein nicht erkannter Zuschnitt lediglich einen Produktionsstopp nach sich zieht, wohingegen ein falsch positiv klassifizierter Zuschnitt vom Bediener unbemerkt vom System verbaut würde und damit zu einem Ausschussbauteil führt. Das System muss dabei auch pathologische Fälle wie quadratische oder kreisförmige Zuschnitte abdecken und sollte künftig fähig sein, auch auf anderen Zuschnitten liegende Zuschnitte sicher zu erkennen, wodurch sich Anforderungen an die Farbtiefe des Sensorchips ergeben. Hinsichtlich der erforderlichen Gesamtgenauigkeit wurde als Ziel 0,25 mm für die Detektion und 0,5 mm für den gesamten Prozess formuliert.

2.2 Systemlayout

Bedingt durch die in Abschnitt 2.1 definierten Anforderungen ergibt sich ein Systemlayout gemäß Abb. 2. Die in einem geschlossenen Aluminiumgehäuse untergebrachte Kamera mit rauscharmem CCD-Sensor und 4,8 mm Objektiv (5) ist auf den Zuschnitt (4) gerichtet. Brennweite und Größe des Kamerachips sind so gewählt, dass sich die in Abschnitt 2.1 angegebenen Bildabmessungen im Abstand von 1 m ergeben. Dem Objektiv vorgesetzt ist ein Polfilter (3), der als Analysator für das von einer Blitzbeleuchtung (1) emittierte und durch einen Polarisator (2) polarisierte Licht fungiert.

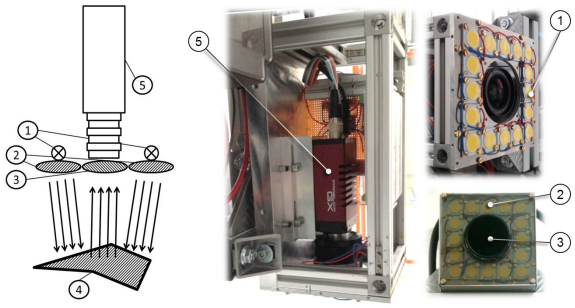

Abbildung 2: Kamerasystem bestehend aus Blitzbeleuchtung (1), Polarisator (2) , Analysator (3) sowie Kamera mit Optik (5). Links unten ist schematisch der Zuschnitt (4) gezeigt.

Der Analysator wird so justiert, dass direkt an der Oberfläche polarisationserhaltend reflektiertes Licht

ausgefiltert wird, wohingegen mehrfach gestreutes Licht, dessen Polarisation statistisch ist, passieren kann. Durch diese Anordnung wird jede gerichtete Reflexion, die durch die Blitzbeleuchtung entsteht, um etwa den Faktor 1000 reduziert, es bleiben lediglich Restspiegelungen, die vom Umgebungslicht herrühren. Da die Blitzbeleuchtung sehr hell ist, können diese Spiegelungen in Grenzen gehalten werden, sofern nicht Umgebungslicht direkt auf den Zuschnitt fällt (Abb. 3). Eine derartige Anordnung zur Vermeidung von Spiegelungen ist beispielsweise in [1] beschrieben.

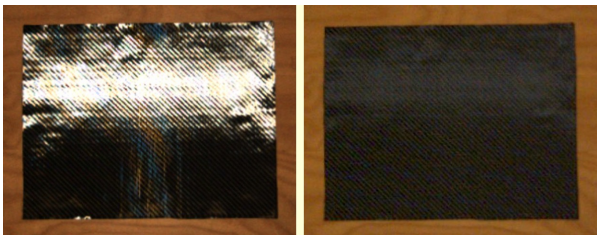

Abbildung 3: Zum Effekt der Polfilter: Links eine Aufnahme ohne Polfilter, rechts mit gekreuzten Polfiltern.

Das gekapselte Kamerasystem wird anschließend an dem am Roboter befindlichen Greifer befestigt. Zum Einsatz kommt in den Testreihen je nach Anwendungsfall der im DLR ZLP vorhandene geeignetste Greifer. Es zeigt sich, dass durch die kurze Brennweite der Optik weit reichende Korrekturen an der Kamerageometrie nötig werden (Abb. 4). In [2] ist ein Verfahren beschrieben, das anhand der Aufnahme von Schachbrettmustern die Verzerrungen einer Kameraoptik korrigieren kann. Neben zahllosen weiteren Funktionen nutzen wir eine freie Implementierung von Zhangs Algorithmus aus der sehr mächtigen Open Source Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV, erhältlich und ausführlich beschrieben unter [3] und [4]. Die korrekte experimentelle Herangehensweise ist in [5] beschrieben.

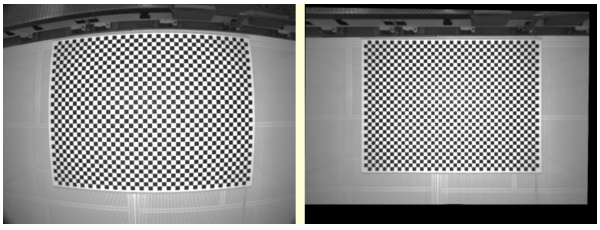

Abbildung 4: Zu Ausmaß und Genauigkeit der Bildkorrektur anhand eines Schachbrettmusters: Links das Kamerabild, links das korrigierte Bild

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es durch die Anwendung von Zhangs Algorithmus in unserem Anwendungsfall gelingt, absolute Abweichungen in der x-y-Ebene im Inneren des Schachbretts von minimal 0,003 mm und maximal 0,663 mm zu erreichen. Der Mittelwert beträgt μ=0,153 mm bei einer Standardabweichung von σ=0,089 mm (Abb. 5). Da die Abweichungen in der Bildmitte 0,1 mm nicht überschreiten, ist das Ergebnis sehr befriedigend, setzt aber voraus, dass für höchste Präzision eine zweite Aufnahme gemacht werden muss, bei der der Roboter so verfahren wird, dass der Zuschnitt in die Bildmitte wandert.

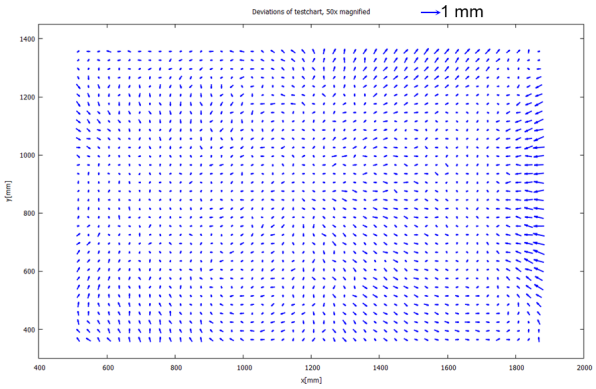

Abbildung 5: Vektorielle Darstellung der Abweichung vom idealen Schachbrettmuster (im Mittel 0,15 mm)

2.3 Absolutpositionierung mit Industrierobotern

Industrieroboter zeichnen sich je nach Modell durch Wiederholgenauigkeiten in der Größenordnung von ≈0,1 mm .. 1,0 mm aus, wohingegen das Anfahren einer absoluten Position aufgrund von systemimmanenten Weichheiten generell um ein bis zwei Zehnerpotenzen weniger genau ist. Der Fehler ist je Roboter individuell verschieden, hängt stark von der Pose des Roboters ab und bereitet bei der Offline-Programmierung oder beim Tausch eines defekten Roboters vielfach Probleme. Daher bieten Roboterhersteller Kalibriermethoden an, durch die die Absolutgenauigkeit deutlich erhöht werden kann (z. B. [6]). Auch nach Anwendung dieser Verfahren hängt die Absolutgenauigkeit vom Anwendungsfall ab, und da im vorliegenden Fall Absolutgenauigkeit benötigt wird, wurde das System aus Roboter, Greifer mit Zuschnittserkennung und Aufnahmetisch mittels eines Leica-Lasertrackers [7] für den konkreten Anwendungsfall der Lagebestimmung eines Zuschnitts aus 1 m Entfernung über einem gegebenen Aufnahmetisch mit anschließendem Greifen des Zuschnitts vermessen. Wie in Abb. 6 gezeigt, wird der Roboter in die Aufnahmeposition 1 m über der Tischmitte bewegt und von dort auf einen 100 x 100 mm-Raster gelegenen Messpunkt gefahren. Dies wiederholt sich für alle 375 Messpunkte. Die vektoriellen Abweichungen von einem idealen 100 x 100 mm-Raster sind in Abb. 7 in 250-facher Vergrößerung dargestellt, man beachte den Maßstab von 1 mm rechts oben in der Legende. Die Abweichungen liegen in diesem konkreten Fall zwischen 0,006 mm und 0,4 mm und betragen im Mittel μ=0,165 mm bei einer Standardabweichung von σ=0,076 mm.

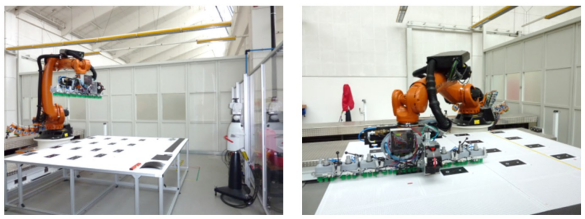

Abbildung 6: Anwendungsfall „Autonomes Greifen”

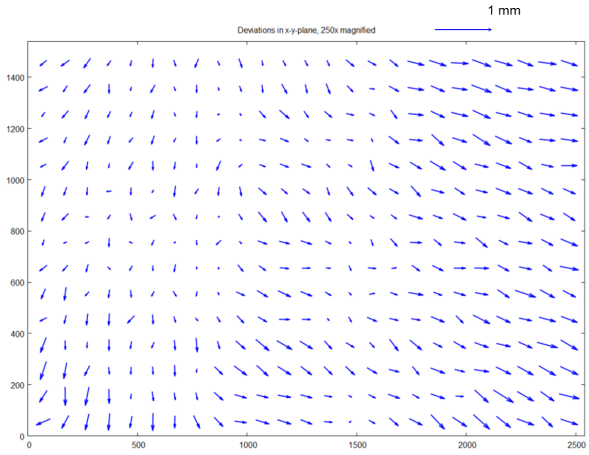

Abbildung 7: Experimentelle Daten für die Absolutgenauigkeit eines Roboters im konkreten Anwendungsfall „Autonomes Greifen”

Vergleichsmessungen in ähnlichen Szenarien ergaben ähnliche Werte, das feinere Rastern einzelner Tiles ergab einen stetigen Verlauf der Messwerte zwischen den vier Eckpunkten hinsichtlich Betrag und Richtung im Rahmen von Messgenauigkeit und gelegentlichen Ausreißern. Die Stetigkeit des Verlaufs ist hierbei besonders erfreulich, da sie besagt, dass nahe beieinander abgelegte Zuschnitte auch gleichsinnige Fehler zeigen, was sich positiv auf den Anschluss benachbarter Zuschnitte oder beim Stapeln auf benachbarte Punkte auswirkt.

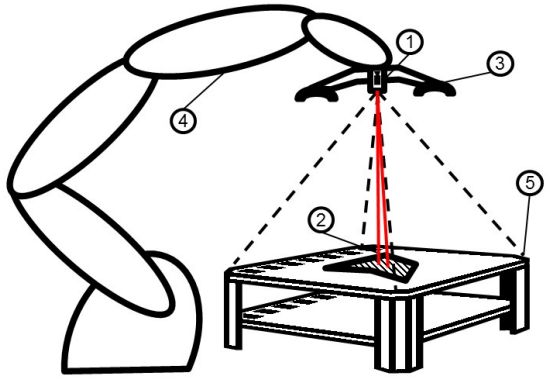

Abbildung 8: Zum Einfluss von Winkelfehlern. 1: Kamera, 2: Zuschnitt, 3: Greifer, 4: Roboter, 5: Aufnahmetisch

Besonderes Augenmerk ist hierbei auf eventuell auftretende Winkelabweichungen zu legen: Abb. 8 zeigt, dass durch den Arbeitsabstand der Kamera ein erheblicher optischer „Hebel” von 1000 mm besteht. Es gilt:

$$h \tan \Delta\phi = \Delta r \tag{1}$$

Eine Winkelabweichung von lediglich 0,06 ° führt damit bereits zu einer Ortsabweichung von 1 mm auf dem Tisch. Untersuchungen zeigten, dass zu schnelles Anfahren der Ausgangsposition bereits zu merklichen Winkelfehlern mit Messfehlern im Bereich von 1 mm führen kann, obwohl die Positionsabweichung unter 0,05 mm beträgt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass auch durch das Kamerasystem im Verlauf einiger Stunden eine scheinbare Verschiebung im Bereich von 1 mm auftritt. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Aufnahmetisch mit vier Referenztargets außerhalb der Nutzfläche versehen, deren Position bei jeder Aufnahme gemessen wird. Hiermit lässt sich eine Perspektiventransformation ermitteln, die die Referenztargets auf ihre ursprünglichen Positionen zurückführt und auf alle im weiteren Verlauf erhaltenen Messwerte angewendet werden kann. Die ursprüngliche Drift von 1 mm kann so auf 0,1 mm reduziert werden (Abb. 9).

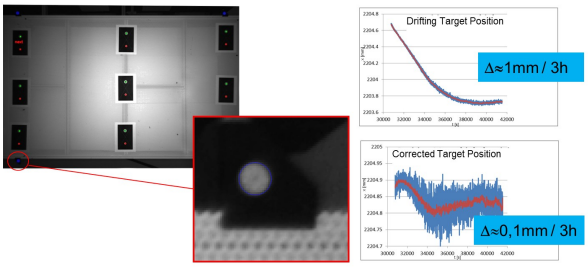

Abbildung 9: Driftverhalten der Messung und Möglichkeit der Korrektur

2.4 Zuschnittserkennung mittels Template Matching

Die Bildverarbeitung bietet verschiedene Methoden, um die Lage von Objekten im digitalen Datenmaterial festzustellen. Neben Interest-Operatoren [8, 9, 10], die besonders auffällige und stabile Merkmale im Bildmaterial bestimmen, existieren zahlreiche Verfahren zur Detektion von Kanten [11, 12]. Nach eigenen Voruntersuchungen zeigten sich für all diese Verfahren Instabilitäten bei der Betrachtung von CFK-Zuschnitten, die auf Spiegelungen und ausgefaserte Materialränder zurückzuführen waren. Daher wurde das Verfahren der normierten Kreuzkorrelation [13] verwendet, das ein integrales und robustes Verfahren zum Bildvergleich auch bei schwierigen Bedingungen ist. Abb. 10 veranschaulicht das Verfahren.

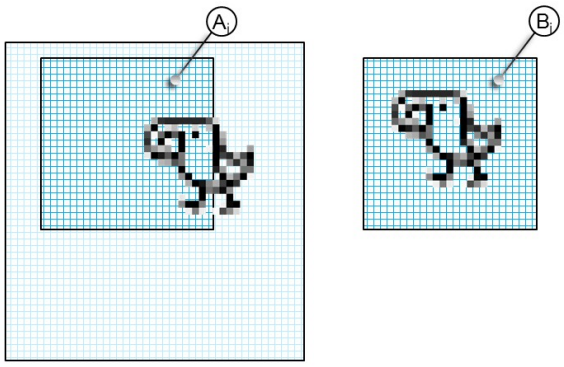

Abbildung 10: Vorgehen beim Template-Matching

Das Bild B (Anzahl Pixel=n) soll in einem größeren Bild gesucht werden. Man berechne nun für jeden möglichen Bildausschnitt A des großen Bildes den Korrelationskoeffizienten c. Dieser berechnet sich aus Kovarianz v und den jeweiligen Standardabweichungen gemäß

$$c = \frac{v(A,B)}{\sigma_A \sigma_B} \tag{2}$$

$$v(A,B) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B) \tag{3}$$

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(A_i - \mu_A)^2} \tag{4}$$

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(B_i - \mu_B)^2} \tag{5}$$

$$\mu_A = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_i \tag{6}$$

$$\mu_B = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} B_i \tag{7}$$

Der Bildausschnitt A mit dem größten Korrelationswert c wird als richtig angenommen. Die Genauigkeit der Lage des Bildausschnitts A kann durch Subpixel-Techniken verbessert werden [13]. Wendet man das Verfahren für alle möglichen Orientierungen von A an, erhält man auch den benötigten Drehwinkel. Das Verfahren ist robust gegen Helligkeitsschwankungen, Spiegelungen und kleinere Abweichungen der Geometrie.

2.5 Systemvalidierung anhand von Testmustern

Zur Untersuchung der Genauigkeit des Gesamtsystems wurden zahlreiche Versuche mit Testmustern durchgeführt. Diese wurden schlicht auf A4-Papier aufgedruckt und sind gegenüber CFK-Zuschnitten sehr preiswert, nutzen sich nicht ab und können nach der Ablage präzise gemessen werden. Je neun Testmuster unterschiedlicher Ausrichtung wurden gegriffen und auf einen Zielpunkt abgelegt, der Versuch in mehreren Testreihen jeweils mehrfach wiederholt. Für die Messung wurde das System selbst unter Kenntnis der Wiederholgenauigkeiten aus Abschnitt 2.2 und 2.3 verwendet. Hierbei zeigte sich unter Optimalbedingungen eine maximale Positionsdifferenz von 0,7 mm bei einer Standardabweichung von σ=0,2 mm. Die Ergebnisse sind dabei nur dauerhaft stabil, wenn Randbedingungen wie Raum- und Robotertemperatur konstant gehalten werden und die Kameradrift korrigiert wird (siehe Abschnitt 2.3).

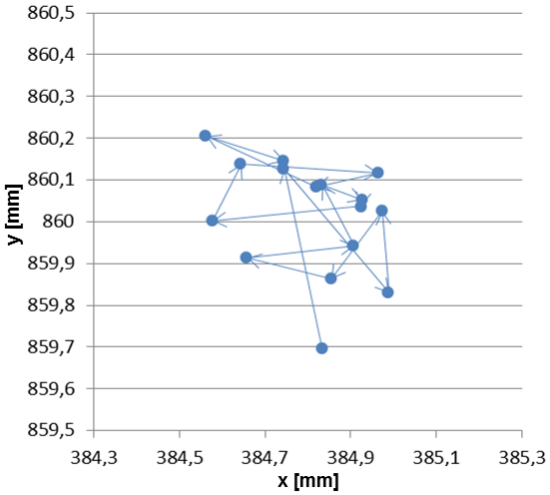

Abbildung 11: Beispiel für die Ablagegenauigkeit von 16 Testmustern

2.6 Weitere Methoden zur Zuschnittserkennung und -bewertung

Wie sich in Vorversuchen bereits zeigte ist die Positionsbestimmung durch Template Matching überaus robust und zeigt bezüglich der Rate der richtig positiv detektierten Zuschnitte sehr gutes Verhalten. Unbefriedigend war hingegen das Verhalten bei sehr ähnlichen Zuschnitten oder falls der richtige Zuschnitt sich nicht auf dem Tisch befand. Der Korrelationskoeffizient ändert sich bei kleineren Geometriebabweichungen nur geringfügig, und so gelingt es nicht mittels Festlegung eines Schwellwerts die benötigte geringe Rate an falsch positiven Detektionen zu erreichen (vgl. 2.1 und 3.1). Daher wurde ein Verfahren gemäß Abb. 12 implementiert.

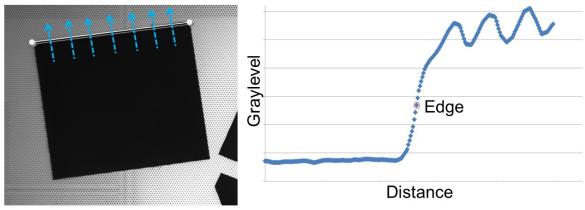

Abbildung 12: Bestimmung der Maßhaltigkeit eines Zuschnitts durch Kantendetektion

Ausgehend von der durch Template Matching (vgl. 2.4) bekannten Position und Orientierung des Zuschnitts werden senkrecht zur Idealkontur in geringem Abstand Schnitte gelegt, in denen man im Grauwertprofil jeweils die Lageabweichung d der Zuschnittskante bestimmt. Da diese Werte anfällig gegenüber kleinen Störungen, wie z. B. Faserstücke an der Schnittkante, sind ist es sinnvoll, fehlerhafte Messwerte zu eliminieren, was durch Verwendung des modifizierten z-scores automatisiert möglich ist [14]. Ersetzt man den Korrelationswert aus 2.4, Gleichung 2, durch einen Score-Wert S gemäß

$$S = c - 0.2 * |MAD| \tag{8}$$

mit

$$MAD = MED(d_i - MED(d_i)) \tag{9}$$

so erhält man ein Bestimmtheitsmaß, das stark sensitiv auf Geometrieabweichungen ist. Hierbei steht MED für den Median-Wert, d. h. den in der Mitte der sortierten Messwerte befindlichen Wert, und MAD für den Median der Beträge der Abweichungen vom Median. Diese Werte ähneln Mittelwert und Standardabweichung, sind aber weniger anfällig gegen Ausreißer.

Ein Beispiel für die durch Verwendung des Score-Werts S erzielten Ergebnisse liefert der Use Case Stringerbase (Abschnitt 3.2): bei der Detektion zweier Zuschnitte der Größe 948 mm x 145 mm und 958 mm x 139 mm bei Vergleich mit der Geometrie von Zuschnitt 1 erhält man im Korrelationskoeffizienten nur einen wenig ausgeprägten Unterschied von 0,95 zu 0,91 (robuste, aber fehlerhafte Detektion), während der Score gemäß Gleichung 8 sich von 0,89 auf 0,56 deutlich reduziert. Somit kann mittels des Scores Zuschnitt 2 ausgeschlossen und eine robuste Detektion mit einem geringen Anteil an Fehldetektionen kombiniert werden.

Weiterhin konnte hinsichtlich der Unterscheidung geometrisch identischer Zuschnitte für mehrere Materialien (hier: Biax-Gelege) gezeigt werden, dass der Faserverlauf im Bildmaterial nach Kontrastspreizung deutlich sichtbar wird (Abb. 13 links).

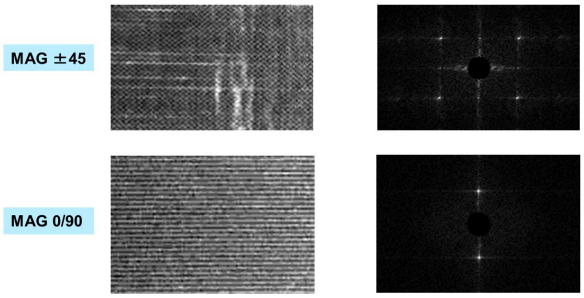

Abbildung 13: Ermittlung des integralen Faserwinkels mittels zweidimensionaler Fast Fourier Transformation

Mittels zweidimensionaler Fast Fourier Transformation (FFT) mit nachfolgender Hochpassfilterung ergibt sich das in Abb. 13 rechts gezeigte Bild: Beim ±45°-Material (oben) finden sich Peaks bei Winkeln von 45°, 135°, 225° und 315°, beim 0°/90°-Material liegen sie bei 90° und 225°; bei Gewebe ist die Situation komplizierter, da sich Kett- und Schussfaden im Höhenprofil abwechseln und der Bindungstyp berücksichtigt werden muss; es liegen jedoch bisher positive Erkenntnisse vor. Es zeichnet sich ab, dass das Materialverhalten vorher untersucht und dem Messprogramm zur Verfügung gestellt werden muss. Eine anschauliche Einführung zum Thema FFT findet sich beispielsweise bei [15].

2.7 Flattening und Geometry Transfer - von 3D nach 2D und zurück

Für ein automatisiertes System ist es nicht nur wichtig, korrekt zu Greifen, sondern auch korrekt abzulegen. Bereits bei der Konstruktion wird mittels Drapiersimulation ermittelt, wie ein ebener 2D-Zuschnitt gegebenen Materials auszusehen hat, damit er nach dem Ablegen und Drapieren in die gewünschte 3D-Form passt (sog. Flattening). Dabei ergibt sich eine bijektive, stetige Abbildung zwischen zwei Flächen. Ein gegebenes lokales, orthogonales Koordinatensystem mit in der 2D-Zuschnittsebene liegender x- und y-Achse wird durch diese Abbildung in ein krummlinig-orthogonales Koordinatensystem (siehe z. B. [16]) mit in der 3D-Zuschnittsfläche liegender x'- und y'-Achse abgebildet. Die z- bzw. z'-Achse ist dabei zur Fläche jeweils orthogonal (Abb. 14).

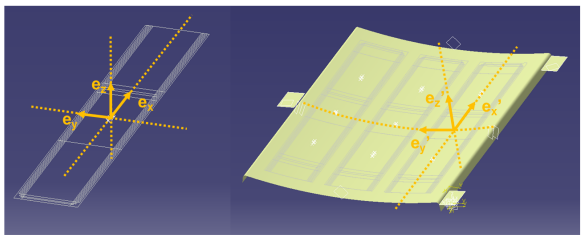

Abbildung 14: Der auf dem ebenen Zuschnitt liegende Greifpunkt wird zusammen mit dem lokalen Dreibein in die 3D-Form transformiert

Legt man Greifpunkt und Greiferorientierung in 2D fest, muss man lediglich die beim Flattening verwendete Abbildung umkehren, um Ablagepunkt und Orientierung in 3D zu erhalten. Hierfür gibt es zwei Wege:

1. Verwendung der beim Flattening verwendeten Software
2. Numerische Näherung bei Kenntnis hinreichend vieler Stützpunkte auf beiden Flächen

Weg 2 scheint dabei langfristig höheres Automatisierungspotenzial zu bieten, es sei denn, man hat direkten Zugriff auf die Drapiersimulations-Software, Weg 1 hingegen ist schneller umsetzbar und wurde hier für die ersten Evaluierungen bevorzugt. Für die Orientierung des Koordinatensystems wurden zwei nahe bei $\vec{r}$ auf der x- bzw. y-Achse liegende Punkte $\vec{x_0}$ und $\vec{y_0}$ mittransformiert. Die transformierten Einheitsvektoren berechnen sich gemäß:

$$\vec{e}_{x'} = \frac{\vec{x'}_0 - \vec{r'}}{|\vec{x'}_0 - \vec{r'}|} \tag{10}$$

$$\vec{e}_{y'} = \frac{\vec{y'}_0 - \vec{r'}}{|\vec{y'}_0 - \vec{r'}|} \tag{11}$$

$$\vec{e}_{z'} = \vec{e}_{x'} \times \vec{e}_{y'} \tag{12}$$

Für den Roboter werden noch Euler-Winkel benötigt. Mit $\vec{e}_{x'} = (x'_1, x'_2, x'_3)$, $\vec{e}_{y'} = (y'_1, y'_2, y'_3)$ und $\vec{e}_{z'} = (z'_1, z'_2, z'_3)$ gilt:

$$A = \arctan \frac{x'_2}{x'_1} \tag{13}$$

$$B = \arcsin -x'_3 \tag{14}$$

$$C = \arctan \frac{y'_3}{z'_3} \tag{15}$$

Mit den bekannten Greif- und Ablegepunkten und deren Orientierungen können nun Testbauteile hergestellt werden.

3 SYSTEMVALIDIERUNG ANHAND VON USE CASES

Nach den positiven Ergebnissen von Abschnitt 2.5 sollte das System im realitätsnahen Einsatz anhand von Testbauteilen validiert werden. Die Herstellung von endkonturnahen Organoblechen sowie die Erstellung einer Stringerbase aus Biax-Gelege in Preformtechnik erschienen dafür geeignet; die Ergebnisse sind im folgenden beschrieben. Da, wie in [17] gezeigt, bei der Herstellung von CFK-Bauteilen hoher Kostendruck besteht, wird neben technischen Aspekten auch eine kurze Einschätzung zum Thema Wirtschaftlichkeit gegeben.

3.1 Use Case 1: Preforming von endkonturnahen Organoblechen

Im Mai 2013 wurden generische Organobleche aus thermoplastischem Gewebe-Prepreg hergestellt (Abb. 15). Es zeigte sich materialbedingt eine deutliche, nach dem Ablegen reversible Aufwölbung, weswegen die Anforderungen an die Ablage geringer sind und die Systemgenauigkeit hier nicht limitierend ist. Das Ablageergebnis wurde im Rahmen der Aufwölbungen als ausreichend bewertet, zu größeren Produktionsfehlern kam es nicht. Es zeigte sich bei etwa 10 % der erstellten Organobleche eine Verwechslung der zwei schmalen Zuschnitte (in Abb. 15 links zu sehen), die sich nur gering in der Länge unterscheiden. Diese Fehler konnten im Nachgang mit der in Abschnitt 2.6 gezeigten Methode eliminiert werden.

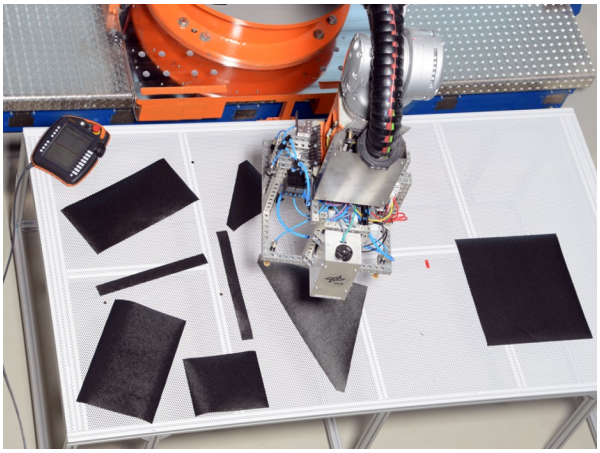

Abbildung 15: Use Case 1, Herstellung eines endkonturnahen Organoblechs

Für jeweils ein Organoblech wurden neun Zuschnitte abgelegt, die Robotergeschwindigkeit betrug 30% der Maximalgeschwindigkeit. Es ergab sich eine Verarbeitungszeit von ≈18 s pro Zuschnitt, was unter Berücksichtigung von Materialgewicht und -fläche einer Ablegerate von 46,6 m^2/h oder 11,1 kg/h entspricht; gemäß interner Einschätzung besteht hierbei ein Optimierungspotenzial auf 25-30 kg/h. Bedenkt man, dass große Tape- oder Faserlegeanlagen maximale Ablegeraten von 50 bis 100 kg/h erreichen ([18] [19]), so scheint für diese Technik wirtschaftliches Potenzial durchaus vorhanden zu sein. Die Anlage wäre bereits jetzt in der Lage 22 Organobleche pro Stunde zu produzieren, wofür pro Minute etwa drei Zuschnitte zugeführt werden müssen. Daher erscheint künftig eine genauere Untersuchung zum Thema Materiallogistik angebracht.

3.2 Use Case 2: Stringerbase-Preforms aus biaxialem Trockengelege

Im Februar 2014 wurde das System am Anwendungsfall einer Unterstützungsstruktur für Stringer (Stringerbase) aus trockenem Biax-Gelege getestet. Im Gegensatz zum Organoblech sind hier die Anforderungen höher, da der Preform so wie er ist im Bauteil verbleibt und außer an der Bauteilkante später nicht mehr besäumt wird. Auch sind die Zuschnitte im Milimeterbereich gestuft, da zum Hautfeld und an eine Umfangsaufdickung hin von der Bauteilauslegung her Rampen vorgegeben sind (Abb. 16), d. h. die Gefahr falsch positiver Detektionen ist hier deutlich höher und die erforderliche Ablagegenauigkeit ist höher. Eine weitere Steigerung der Komplexität ergibt sich daraus, dass die Zuschnitte in eine gekrümmte Form abgelegt werden müssen, wozu man sich der in Abschnitt 2.7 beschriebenen Methoden bedienen kann.

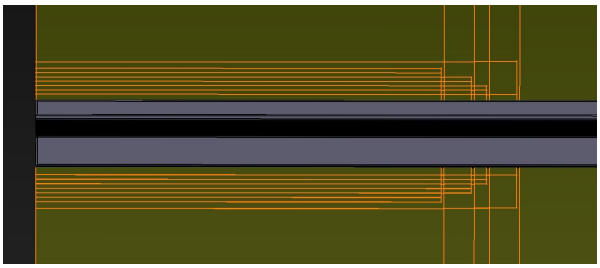

Abbildung 16: Zum Aufbau der Stringerbase

Es handelt sich insgesamt um je sechs kurze und sechs lange Preforms, die je aus acht Lagen bestehen. Auch hier wurde die Robotergeschwindigkeit auf 30% gesetzt; die Zuschnitte wurden mittels autonomem Greifen eben aufgenommen und auf die im Vorfeld bestimmten 3D-Koordinaten automatisch abgelegt. Durch die in Abschnitt 2.6 beschriebene Methode der Einbeziehung der Kanten konnten die falsch positiven Detektionen auf null gesenkt werden.

Die Verarbeitungszeit pro Zuschnitt betrug dabei ≈30 s, die stündliche Ablegerate wurde zu 16,8 m^2/h bzw. 4,2 kg/h Trockenmaterial bestimmt. Die im Vergleich zu 3.1 deutlich höhere Zeit pro Zuschnitt ist teilweise auf eine etwas langsamere, da genauere Detektion, und zum Großteil auf die längere Transferzeit in die Form zurückzuführen. Zusätzlich tragen die im Durchschnitt geringere Zuschnittsgröße und das kleinere Flächengewicht des Materials deutlich zur Senkung der Legerate bei. Nach unserer Einschätzung ist das Potenzial vorhanden, insgesamt analog zu Abschnitt 3.1 eine Legerate von 25-30 kg/h zu erreichen, sofern man sich auf das gesamte Bauteil aus Faser und Matrix bezieht. Im momentanen Zustand können 15 Preforms pro Stunde abgelegt werden, und auch hier gilt es, ein Konzept für die Materiallogistik zu entwerfen, um das wirtschaftliche Potenzial des Verfahrens aufzuzeigen.

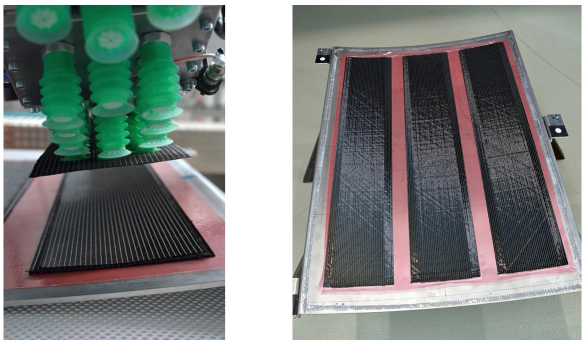

Abbildung 17: Herstellung einer Stringerbase-Preform. Links: Ablage, rechts: Preforms nach dem Kompaktieren

4 AUSBLICK

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die Kombination eines Industrieroboters mit einem Bildverarbeitungssystem in der CFK-Produktion eingesetzt werden kann. Die erreichbaren Genauigkeiten und Legeraten sind für die betrachteten Anwendungsfälle ermutigend. Es zeigte sich eine Vielzahl von sich überlagernden Einflüssen, die neben optischen Effekten wie Linsenverzerrung oder Randunschärfen auch mechanische Abweichungen durch Temperaturänderungen beinhalteten. Diese Einflüsse sind Gegenstand weiterer Untersuchungen, da unser Ziel die Erweiterung der zulässigen Betriebsbedingungen auf eine typische Industrieumgebung und der Nachweis der dafür nötigen Prozessstabilität ist. Eine detaillierte Betrachtung unter Berücksichtigung der Anlagenkosten sollte erfolgen.

Literatur

[1] DIN 16536-1, Prüfung von Drucken und Druckfarben der Drucktechnik - Farbdichtemessungen an Drucken - Teil 1: Begriffe und Durchführung der Messung, 1997

[2] Z. Zhang, „A Flexible New Technique for Camera Calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000

[3] `http://opencv.org`, Datum: 20. 8. 2014

[4] `http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html`, Datum: 20. 8. 2014

[5] J. Y. Bouguet, „MATLAB calibration tool.", `http//www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc`, Datum: 20. 8. 2014

[6] R. Bischoff, „Verfahren und Vorrichtung zum Verbessern der Positioniergenauigkeit eines Handhabungsgeräts”, DE102004026814A1, Offenlegungsschrift, 2005

[7] Hexagon Metrology, Produktbroschüre „Leica Absolute Tracker AT901”, http://www.leica-geosystems.de, Datum: 20. 8. 2014

[8] C. Harris, M. Stephens, „A combined corner and edge detector”, Fourth Alvey Vision Conference, 147–151, Manchester, UK, 1988

[9] H. Moravec, „Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover”, Tech Report CMU-RI-TR-3 Carnegie-Mellon University, Robotics Institute, 1980

[10] S. M. Smith, J. M. Brady, „SUSAN - a new approach to low level image processing”, International Journal of Computer Vision 23 (1): 45–78, May 1997

[11] S. Suzuki, K. Abe, „Topological Structural Analysis of Digital Binary Images by Border Following”, CVGIP, v.30, n.1. 1985, pp. 32-46

[12] J. F. Canny, „A computational approach to edge detection”. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6):679–698, 1986

[13] C. Echerer, M. Schönert, A. Schuster, „Verfahren zur Regelung von drucktechnischen Prozessen”, DE 102007007447A1, Offenlegungsschrift, 2007

[14] B. Iglewicz and D. Hoaglin, „How to Detect and Handle Outliers” The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques (Editor: Edward F. Mykytka, Ph.D.), Volume 16, 1993

[15] J. M. Brayer, „Introduction to Fourier Transforms for Image Processing”, https://www.cs.unm.edu/~brayer/vision/fourier.html, Datum: 26. 8. 2014

[16] S. Großmann, „Mathematischer Einführungskurs für die Physik”, B. G. Teubner, Stuttgart (1988), S. 250 ff

[17] G. Berchtold, „Innovatives CFK-Fertigungsverfahren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten”, Präsentation auf dem DLR-Wissenschaftstag, Braunschweig, 11. Oktober 2007

[18] W. Dudenhausen, „Automatisierung und Qualitätssicherung in der Produktionstechnik im ZLP-Augsburg”, Präsentation auf dem 1. Augsburger Produktionstechnik Kolloquium, Augsburg, 18. Mai 2011

[19] G. Berchtold, R. Schimkus, K. Schulte, „Automatisierungstechnologien für große CFK-Strukturen der Luftfahrt”, Lightweight Design, October 2009, Volume 2, Issue 4-5, pp 72-76