Analyse der Messleistung eines Laser Range Scanners im Hinblick auf 2D-Merkmale und das Fehlermaß „Accuracy“

Martin Mader

Bachelorarbeit

Fachbereich Informatik und Informationswissenschaft
AG Multimedia Signalverarbeitung
Universität Konstanz

1. Gutachter : Prof. D. Saupe
2. Gutachter : Prof. O. Deussen

11. August 2004

Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit behandelt die Analyse der Messung des 3D-Laserscanners VI-900 der Firma Minolta. Der Scanner produziert ein 3D-Modell und eine 2D-Texturaufnahme einer Szene.
Im ersten Abschnitt der Arbeit wird die 2D-Aufnahme analysiert. Es werden Methoden zur Messung der technischen und geometrischen Auflösung vorgestellt und eigene Versuchsergebnisse präsentiert. Die geometrische Auflösung wird mittels sog. Linebar Patterns im Ortsraum, und mittels der Modulation Transfer Function im Frequenzraum untersucht.
Im zweiten Abschnitt wird die 3D-Messung behandelt. Dabei wird zunächst das grundlegende Triangulationsprinzip erklärt und eine Übersicht über die gebräuchlichsten Fehlermaße vorgestellt. Im Anschluss wird das Fehlermaß „Accuracy“ genauer erläutert und ein eigener Versuch zur Bestimmung der Accuracy in z-Richtung beschrieben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **2**

2 2D-Eigenschaften **4**

2.1 Technische Auflösung 4

2.2 Geometrische Auflösung 7

2.2.1 Vorversuch mit dem USAF-Target 8

2.2.2 Versuch mit „GeoResPattern“ 12

2.3 Die „Modulation Transfer Function“ 14

2.3.1 Definition der MTF 14

2.3.2 Der ISO 12233 Standard und der „Slanted Edge“ Test . 16

3 Die Entfernungsmessung **20**

3.1 Das Triangulationsprinzip 20

3.2 Fehlermaße und Fehlerquellen 21

3.3 Accuracy 23

3.3.1 Allgemeine Methodik 23

3.3.2 Ein eigener Versuch 24

4 Schlusswort und Danksagung **27**

A Programme **31**

1 Einleitung

3D-Laserscanner Systeme finden heutzutage eine immer größere Verbreitung und werden in vielfältigen Gebieten eingestetzt, wie Archäologie, Medizin, Raumfahrt, Produktion, Robotik oder Produktdesign. Dabei werden kommerzielle Geräte erst seit wenigen Jahren vertrieben, in der Forschung gibt es erste Systeme allerdings seit Ende der 70er. Schon seit Anfang der 80er Jahre beschäftigen sich die Wissenschaftler um M. Rioux am National Research Council of Canada mit aktiven 3D-Laserscannern. Von der NASA und CSA unterstützt entwickelten sie z.B. ein System für die Inernational Space Station, das viele Operationen wie Wartung und Docking vereinfacht. Im Rahmen dieser Entwicklungen wurde natürlich auch viel zur Analyse dieser Systeme erforscht. Ebenfalls in den 80ern wurde von J. Besl ein Versuch unternommen, ein Mass für die Leistung verschiedener Arten von Entfernungsmessgeräten, darunter auch Laserscanner, zu entwickeln [8]. Dort werden auch bereits die Begriffe „Precision“ und „Accuracy“ definiert. Ein weiterer früher Artikel, der oft zitiert wird, stammt von Paakari und Moring. Darin werden zur Analyse der Qualität von entfernungsmessenden Geräten Tests anhand von einfachen Referenzobjekten vorgeschlagen [9].

Die Zahl kommerzieller Anbieter von 3D-Laserscannern wird immer grösser, und die Geräte immer genauer. Ein Problem ist jedoch immer noch, dass die Aussagen der Hersteller zur Genauigkeit ihrer Systeme meist nicht direkt vergleichbar sind, da bei den Angaben in den Katalogen und Internetseiten oft unklar ist, auf welche Art von Messfehler sie sich beziehen, und wie diese gemessen wurden. Nur langsam entwickeln sich standardisierte Testprozeduren für verschiedene Geräte. Dies ist natürlich auch extrem schwierig, da die einzelnen Geräte auf verschiedenste Anwendungen ausgerichtet sind. So wurde z.B. am „Institut für raumbezogene Informations- und Messtechnik“ der FH Mainz versucht, mehrere Systeme mit unterschiedlichen Eigenschaften zu charakterisieren [16]. Auch das „National Institute of Standards and Technology“ (NIST) [12, 13] versucht seit einiger Zeit, Standards für die Charakterisierung von Laserscanner Systemen zu entwickeln – bis jetzt leider

relativ erfolglos.
Das Gerät, mit dem wir arbeiten, ist der 3D-Laserscanner VI 900 der Firma Minolta[1]. Dieser Scanner basiert auf dem Prinzip der Triangulation und ist auf Entfernungen von 60cm bis zu 2,5m ausgerichtet. In dieser Arbeit sollen nun die Messeigenschaften des Geräts untersucht und mit den Angaben des Herstellers verglichen werden, soweit möglich.
Neben der 3D-Messung des Geräts sollen auch die Eigenschaften des Systems als gewöhnliche Digitalkamera bestimmet werden. Bei jeder Aufnahme gibt der Scanner auch ein 2D-Bild aus, das später als Textur auf das dreidimensionale Modell angebracht werden kann.
Die zweidimensionale Photographie ist aufgrund des Alters natürlich weit mehr erforscht als die 3D-Messung mit Laserscannern. Ein grundlegendes Werk zur analogen Photographie stammt von Dainty und Shaw [4]. Die dort vorgestellten Prinzipien lassen sich auch auf die digitale Photographie übertragen. Die Bestimmung der Auflösung einer Kamera ist sehr gut standardisiert, hier gibt es zwei grundlegende Prinzipien: Zum einen die Analyse im Ortsraum über Testbilder, die typischerweise aus schwarz-weißen Linienpaaren besteht, und zum anderen die Analyse der räumlichen Frequenzantwort der Kamera. Letzteres Prinzip ist in einem ISO Standard [5] zur Messung der Auflösung von Digitalkameras verankert.
Im ersten Abschnitt werden die technische Auflösung und die geometrische Auflösung bei der (zweidimensionalen) Texturaufnahme bestimmt. Dann wird das Triangulationsprinzip kurz erklärt, und die Fehlermaße zur Entfernungsmessung definiert. Im letzten Abschnitt wird das Fehlermaß „Accuracy“ genauer untersucht. Die zufälligen Fehler werden ausführlich in [1] behandelt. Im Anhang finden sich die Erläuterungen zu den Programmen, die zur Analyse der Versuche benötigt werden.

[1] Hestellerangaben s. [2]

2 2D-Eigenschaften

Der VI 900 Laserscanner macht in einem Zug zwei Arten von Aufnahmen. Zum einen wird die Oberfläche eines Objekts abgetastet und in ein dreidimensionales Koordinatensystem transferiert. Zum anderen wird eine zweidimensionale Aufnahme des Objekts gemacht, die später als Textur auf dem Modell angebracht werden kann. Hierbei kann der Scanner als gewöhnliche Digitalkamera betrachtet werden. Im nachfolgenden sollen nun die Eigenschaften des Scanners als solche Kamera untersucht werden.

2.1 Technische Auflösung

In den technischen Angaben zur CCD-Kamera des Geräts wird eine Auflösung von 640*480 Pixel berichtet. Das Ausgabebild der Kamera hat genau diese Auflösung, es wäre jedoch möglich, dass die Anzahl der Pixel auf dem CCD-Feld geringer ist, und die Auflösung des Ausgabebildes durch Interpolation erhöht wird. Um die Korrektheit dieser Angaben zu überprüfen, habe ich einen Versuch entworfen, der die tatsächliche Anzahl der Pixel auf dem CCD-Feld bestimmt. Diese Zahl definieren wir als technische Auflösung des Systems. Das Testbild für diesen Versuch besteht aus schwarz-weißen Linienpaaren mit unterschiedlichen Linienpaarfrequenzen (LP-Frequenzen), so dass die Zahl der schwarz-weiß Übergänge kontinuierlich ansteigt. In einer Aufnahme wird die maximale Anzahl an Übergängen gezählt. Bilder dieser Art werden als Linebar-Patterns bzw. -Targets bezeichnet.
Für den Versuch implementierte ich das Programm „NumPixPattern“, das ein Pattern mit beliebigen von rechts nach links kontinuierlich ansteigenden LP-Frequenzen erzeugt (vgl. Abbildung 1). Das Pattern wurde mit 1200 dpi in DIN A3 gedruckt und vertikal bzw. horizontal ausgerichtet mit der CCD-Kamera des Scanners fotografiert. Dabei ist zu beachten, dass das „Field of View“ (FOV) des Scanners kleiner als das aufgenommene Pattern sein muss. Die LP-Frequenz in dem Pattern stieg von 0.7 lp/mm auf 1.0 lp/mm. Mit dem gewählten Abstand lag die maximale Auflösung genau innerhalb dieses

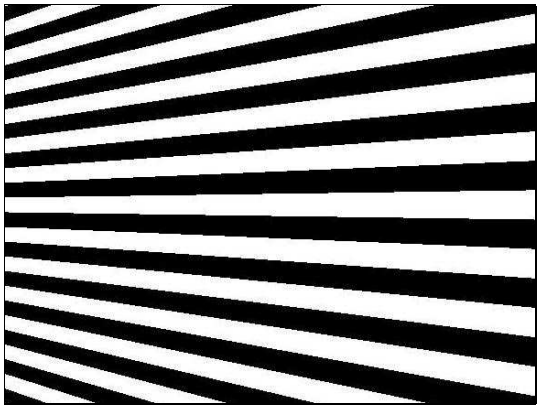
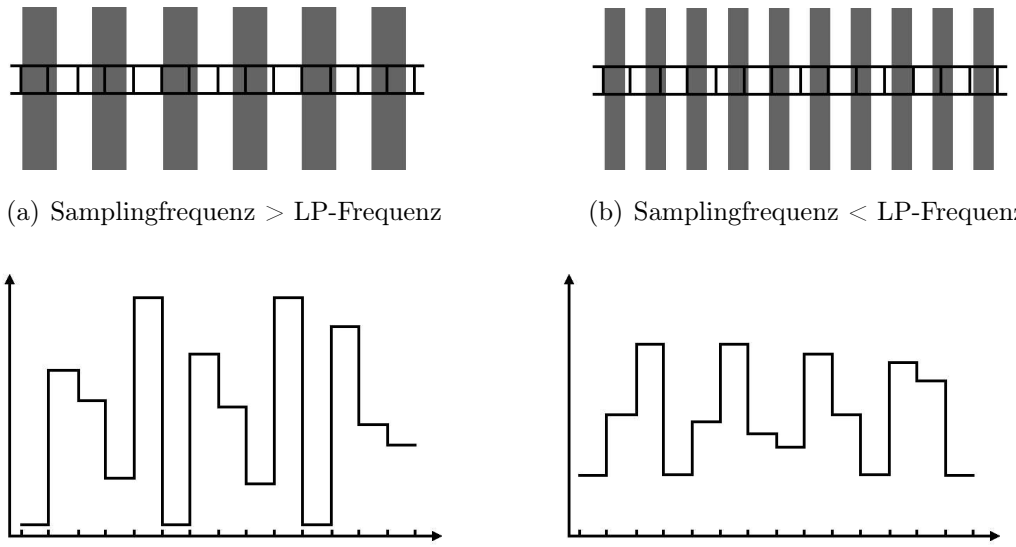


Abbildung 1: Testpattern zur Bestimmung der Pixelanzahl; in den Versuchen deutlich höhere LP-Frequenzen

Intervalls. Das aufgenommene Bild wurde dann mit dem Matlab-Programm „numpix.m“ analysiert, welches in jeder Spalte bzw. Zeile die Anzahl signifikanter Extrema des Intensitätsverlaufs zählt und als Diagramm zeichnet.
Liegt die LP-Frequenz unterhalb der maximalen Auflösung der Kamera, so gibt es für jede schwarze und weiße Linien durchschnittlich mindestens ein Pixel. In diesem Falle steigt die Anzahl der erkannten Extrema mit der LP-Frequenz. Wenn die LP-Frequenz die Auflösung des CCD-Feldes übersteigt, gibt es mehr Linien als Pixel. Somit können nicht mehr alle Linien richtig erkannt werden und die Anzahl der gezählten Extrema nimmt mit steigender Frequenz ab, denn alle Extrema der Aufnahme enstammen dann Aliasschwingungen. Abbildung 2 veranschaulicht diese zwei Fälle. Abbildung 2(a) und 2(b) zeigen schematisch schwarz-weißen Linienpaare einer bestimmten LP-Frequenz (gross) und das Samplingraster des CCD-Feldes (klein), wobei im ersten Fall die Samplingfrequenz höher ist als die LP-Frequenz des Patterns und im zweiten umgekehrt. In den Abbildungen 2(c) und 2(d) sieht man die entsprechenden Grauwertprofile, welche die Kamera ausgibt. Wegen Aliasing werden im zweiten Fall nicht mehr alle Linien aufgelöst.
Liegt die Anzahl der Linien knapp unter der maximalen Auflösung des Geräts, so kommt es zu starken Schwankungen der Anzahl an erkannten Linien. Der Grund dafür sind Phasenverschiebungen zwischen den Pixeln und Li-



(a) Samplingfrequenz > LP-Frequenz

(b) Samplingfrequenz < LP-Frequenz

(c) Grauwertprofil zu (a)

(d) Grauwertprofil zu (b)

Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Samplingfrequenz, LP-Frequenz und erkannten Extrema.

nien, die dazu führen dass auf einige Pixel eine schwarze und weiße Linie zu gleichem Anteil trifft und der mittlere Grauwert beider Linien angezeigt wird. Ist dies bei zwei benachbahrten Pixeln der Fall, so kann mindestens ein Extremum nicht erkannt werden. Entspricht die Anzahl an schwarzen und weißen Linien der Anzahl an Pixeln, so wird die maximale Anzahl an Extrema erreicht, es sei denn, die Phase zwischen Linien und Pixeln, die sich in diesem Falle nicht verschiebt, entspricht genau 0.5 Pixel. Dann würde kein Extremum auftreten und jeder Pixel den gleichen Intensitätswert anzeigen. Dieser Fall wird in der Praxis jedoch kaum eintreten.

Abbildung 3 zeigt das Diagramm, das numpix bei der Analyse der vertikalen Auflösung ausgeben hat. Wie zu erwarten war, steigt die Anzahl der Extrema von rechts nach links zuerst an, erreicht dann das Maximum von 480 Übergängen und fällt danach wieder. Es ist also gezeigt, dass das CCD-Feld des Scanners in vertikaler Richtung tatsächlich 480 aktive Pixel aufweist. Ein weiterer Versuch, bei dem das Pattern einfach um 90 Grad gedreht aufgenom-

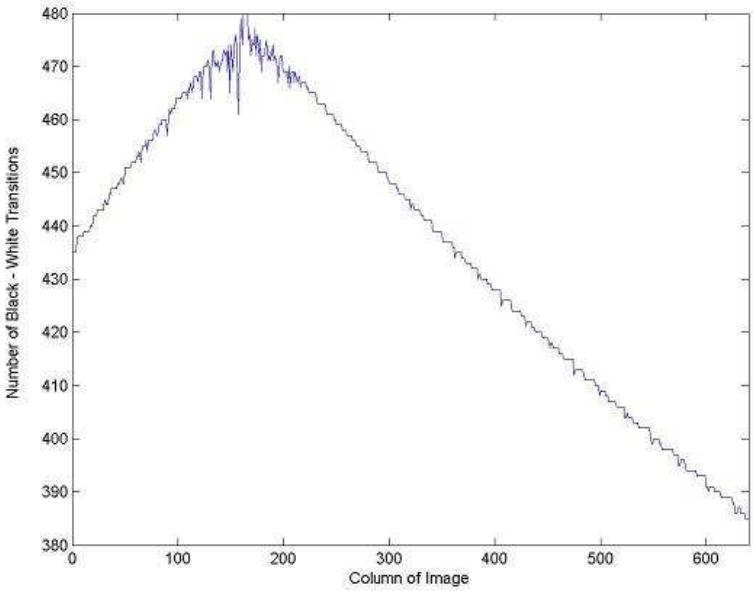


Abbildung 3: Analyse des Patterns mit der Matlab-Funktion 'numpix.m'

men wurde, bestätigte die Zahl von 640 Pixeln für die horizontale Auflösung des Geräts. Die Angaben des Herstellers sind also korrekt.

2.2 Geometrische Auflösung

Die geometrische Auflösung bezieht sich darauf, wie gut eine Kamera feine Details vom Original in die digitale Aufnahme abbilden kann. In der analogen Fotografie existieren einige standardisierte Testpattern, um diese Größe zu bestimmen, wie z.B. das USAF-Target (s. Abbildung 4); sie bestehen meistens aus schwarz-weißen Linien mit einer bekannten Frequenz, die in lp/mm („linepairs per mm") angegeben werden kann. Diese Patterns können nun auch zur Bestimmung der geometrischen Auflösung von digitalen Kameras verwendet werden, allerdings macht die Angabe lp/mm für digitale Sensoren keinen Sinn. Daher wird die Auflösung in lp bzw. Cycles pro Pixel oder in LW/PH („line widths per picture height") angegeben [5]. Diese Größen sind unabhängig von der Entfernung der Kamera zum Testpattern.

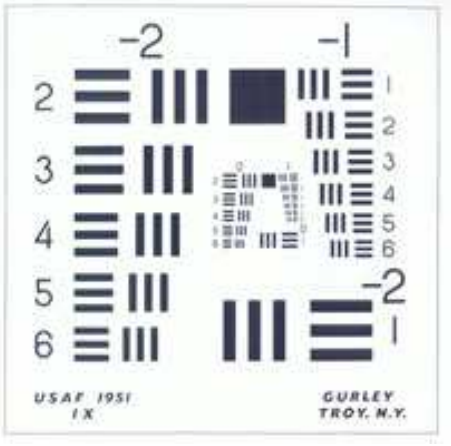


Abbildung 4: Das USAF Test Target

Wenn ein solches Testpattern verwendet wird, hängen die Ergebnisse natürlich vom Kontrast und der Beleuchtung des Patterns ab. Um die maximale geometrische Auflösung zu bestimmen, muss man also für einen hohen Kontrast des Patterns und eine professionelle Beleuchtung sorgen. Leider konnte ich in meinen Versuchen keine perfekten Bedingungen schaffen, da mir keine professionelle Studiobeleuchtung zur Verfügung stand. Dies ist allerdings akzeptabel, da bei der Benutzung von 3D-Laserscannern wohl selten so perfekte Bedingungen vorherrschen. Die Angaben über die geometrische Auflösung aus den Versuchen mit dem Minolta VI 900 sind also eher als praktisch relevante Aussage und nicht als theoretischer Maximalwert zu verstehen.

2.2.1 Vorversuch mit dem USAF-Target

Zuerst führte ich einen Versuch mit dem USAF-Pattern durch. Dieses kann in einer hohen Qualität erworben werden[2], allerdings gibt es auch kostenlose Kopien im Internet[3]. Da dies nur ein Vorversuch war, genügt die Qualität dieser Kopien. Auf dem USAF-Pattern sind Gruppen von schwarz-weißen Linien abgebildet. Jede Gruppe besteht aus sechs durchnummerierten Elementen, die wiederum aus je drei horizontalen und drei vertikalen schwarzen

[2] z.B. www.precisionopticalimaging.com
[3] z.B. http://medfmt.8k.com/mf/resolution.html

Linien bestehen. Die Elemente der ungeraden Gruppen sind immer in der oberen rechten Ecke positioniert, das erste Element einer geraden Gruppe in der unteren rechten Ecke, und die restlichen fünf Elemente sind auf der linken Seite angeordnet. Die Breite der Linien l nimmt dabei von Element zu Element um den Faktor $\sqrt[6]{2}$ ab und läßt sich daher aus der Nummer der Gruppe und des Elements mit folgender Formel bestimmen [3]:

$$l\ [mm] = c * \frac{1}{2^{Gruppe+1+(Element-1)/6}} \tag{1}$$

Hierbei ist c eine Konstante, die von der Größe des Ausdrucks abhängt; in unserem Fall ist $c = 4$.

Um nun die geometrische Auflösung zu bestimmen, geht man folgendermaßen vor: Zuerst wird das USAF-Pattern so ausgerichtet, dass es im FOV der Kamera enthalten ist, und der Abstand zwischen Kamera und Pattern gemessen. Dann werden eine oder mehrere Aufnahmen gemacht. In den Bildern muss nun inspiziert werden, welches Element als letztes noch richtig aufgelöst wird, d.h. alle drei schwarzen Linien korrekt erkannt werden. Um diese Entscheidung zu vereinfachen, kann ein Programm benutzt werden, das ein Grauwertprofil entlang einer Scanlinie in der Aufnahme erzeugt; so ein Programm ist z.B. über [3] zu finden. Abbildung 5 zeigt die Inspektion einer Aufnahme, der Ausschnitt beinhaltet Elemente der Gruppe zwei. Die Intensitätsverteilungen machen deutlich, dass bei Betrachtung der vertikalen Linien das vierte Element noch aufgelöst wird, das fünfte jedoch nicht mehr. Das vierte Element der zweiten Gruppe ist also das letzte, in dem noch alle vertikalen Linien aufgelöst sind.
Der Wert LW/PH läßt sich aus der nach obiger Formel berechneten Linienbreite l $[mm]$ und der Größe des FOV s_{FOV} $[mm]$ in der zu untersuchenden Richtung berechnen.

$$LWPH = s_{FOV}\ *\ \frac{1}{l} \tag{2}$$

Die Höhe s_{FOV} des FOV ergibt sich bei unserem Scanner aus dem Ab-

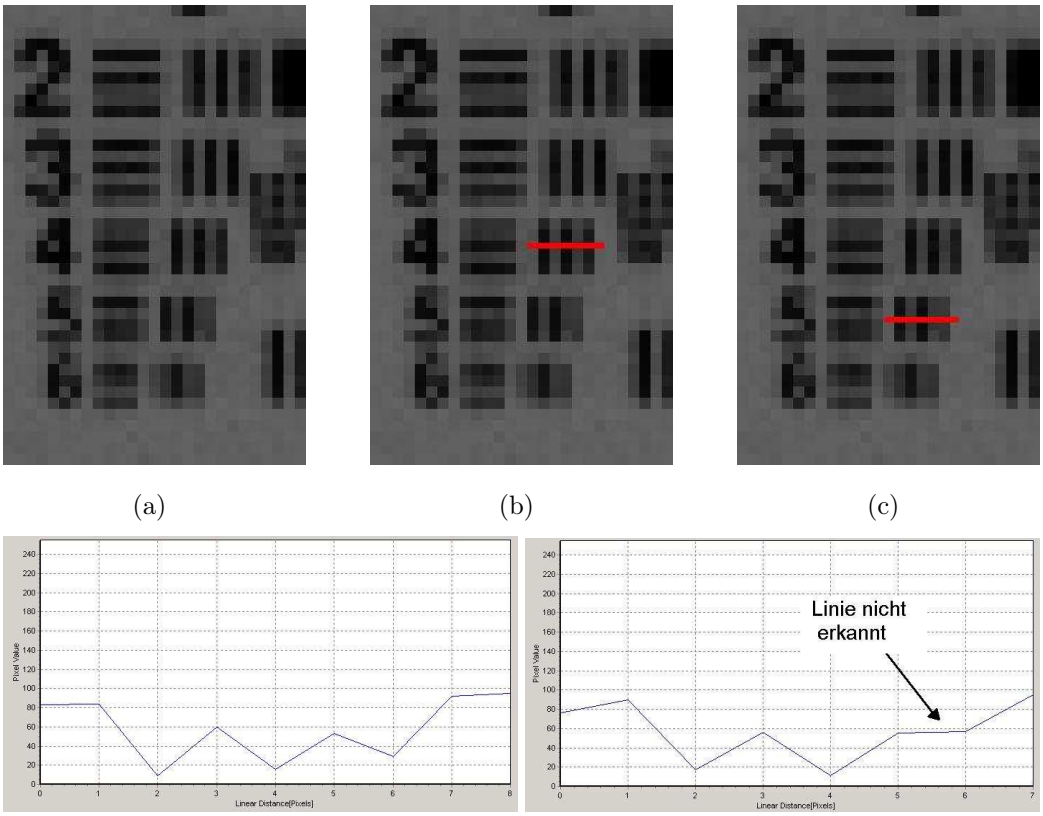


Abbildung 5: Untersuchung einer Aufnahme des USAF-Patterns :
(a) Ausschnitt der Gruppe 2; (b) bzw. (c) Scanlinien durch die Elemente 4 bzw. 5; (d) bzw. (e) Intensitätsverteilung entlang der Scanlinien

stand d $[mm]$ als

$$s_{FOV} = \frac{d\sqrt{2}}{10} \tag{3}$$

Um die Breite des FOV zu erhalten, muss dieser Wert noch mit dem Faktor 1.33 multipliziert werden. Der entsprechende Wert in Cycles pro Pixel *cpp* ergibt sich dann als:

$$cpp = \frac{LWPH}{2 * x_{FOV}} \tag{4}$$

wobei x_{FOV} die Anzahl der Pixel in der gewünschten Richtung bezeichnet, beim Minolta VI900 also 640 für die horizontale und 480 für die vertikale Auflösung.

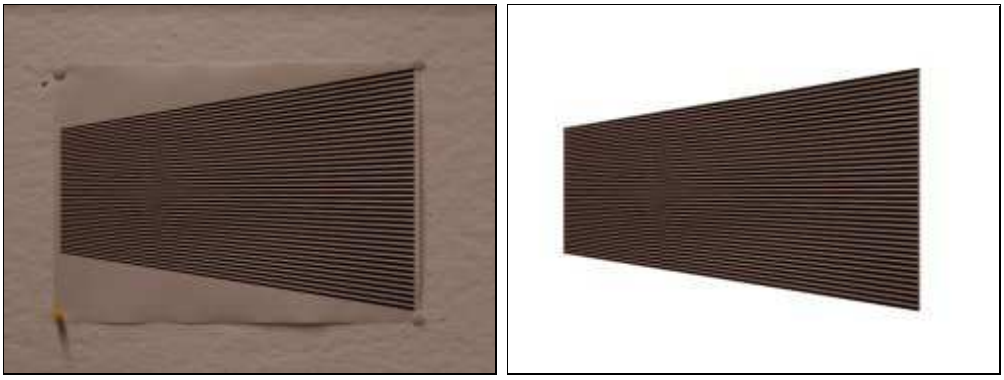
Scan	Gruppe	Element	Cycles/Pixel	LW/PH
1	2	4	0.54	697
2	2	3	0.49	621
3	2	3	0.49	621
4	2	2	0.43	553
5	2	4	0.54	697
6	2	4	0.54	697
mean			0.51	648
stdev			0.05	59

Abbildung 6: Untersuchung der horizontalen geometrischen Auflösung mit dem USAF-Pattern, der Abstand zur Kamera betrug 1,30 m.

Ein Problem bei diesem Versuch ist, dass die visuelle Inspektion der lokalen Minima und Maxima ziemlich subjektiv ist, und verschiedene Beobachter leicht zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen können. Außerdem ist unklar, ob eine Linie bereits als aufgelöst betrachtet wird, wenn in der Intensitätsverteilung über eine Scanlinie ein Extremum auftritt, oder erst, wenn zwischen zwei Extrema ein für die menschliche Wahrnemung signifikanter Intensitätsunterschied besteht. Um also die Unabhängigkeit vom Beobachter zu gewährleisten, muss der Prozess automatisiert werden.

Wenn mehrere Versuche mit dem USAF-Pattern durchgeführt werden, wird ein weiteres Problem deutlich. Da ein Element nur aus drei Linien besteht, ist es nicht robust gegenüber Phasenverschiebungen, d.h. wenn zwischen zwei Aufnahmen die Position der Kamera zum Pattern leicht verändert wird, kann es dadurch zu starken Schwankungen in den Ergebnissen kommen, wie in Tabelle 6 zu sehen ist. Diese zeigt die Versuchsergebnisse von sechs Aufnahmen mit dem Minolta VI 900, in denen wie oben beschrieben die horizontale geometrische Auflösung untersucht wurde; zwischen jeder Aufnahme wurde das Gerät in horizontaler Richtung leicht verschoben, so dass unterschiedliche Phasen auftreten.

Diese Ergebnisse sind offensichtlich sehr ungenau, in drei der sechs Aufnah-



(a) Aufnahme des Patterns (b) nach der „Einfärbung“

Abbildung 7: Testpattern, das zur Bestimmung der Winkelauflösung verwendet wird.

men liegt die limitierende Auflösung über der Nyquist-Frequenz von 0.5 Cycles/Pixel. Dies ist theoretisch nicht möglich, anscheinend traten bei diesen Aufnahmen zufällig sehr günstige Phasen auf. Die Ergebnisse streuen außerdem stark, da der Unterschied der Lp-Frequenz zweier aufeinanderfolgender Elemente relativ groß ist. Es ist also ein robusteres Testpattern notwendig, um die geometrische Auflösung mit größerer Genauigkeit zu bestimmen.

2.2.2 Versuch mit „GeoResPattern“

Das unter dem Punkt „Technische Auflösung“ verwendete Pattern wurde so modifiziert, dass die Anzahl der Linien im gesamten Pattern konstant ist. Das Pattern wird mit dem Programm „GeoResPattern“ erstellt und kann mit „xfig“ ins pdf-Format exportiert und dann ausgedruckt werden. Es lässt sich wieder eine beliebige Linienbreite auf der rechten und linken Seite des Patterns einstellen; die Linienpaarfrequenz nimmt dabei von rechts nach links kontinuierlich zu.

Dieses Pattern wird nun so aufgenommen, dass es, wie in Abbildung 7(a) zu sehen, komplett im FOV der Kamera enthalten ist. Vor der weiteren Analyse muss die Fläche um das Pattern herum mit Hilfe eines Grafikprogramms[4]

[4]Paint Shop Pro o.ä.

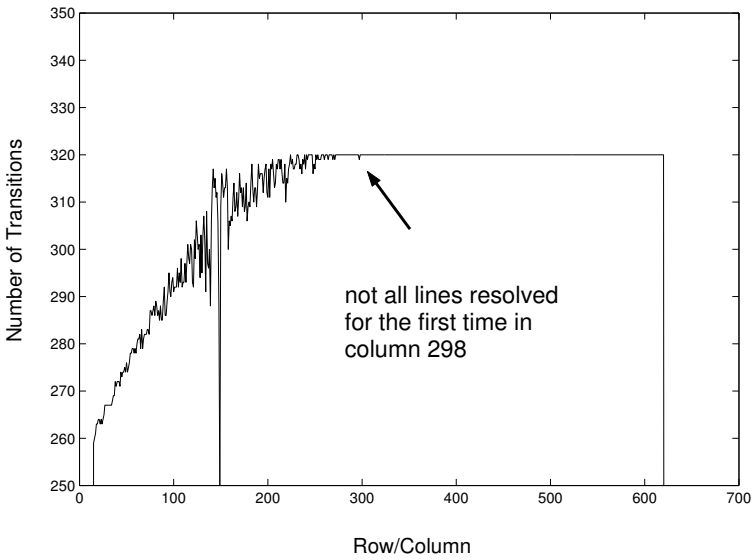


Abbildung 8: Analyse eines Patterns mit 320 Linien.

weiß „eingefärbt“ werden, damit die Matlab-Funktion „geores.m“ die Grenzen des Musters erkennen kann. Abbildung 7(b) zeigt eine Aufnahme nach diesem Bearbeitungsschritt.

Die Funktion bestimmt zuerst die Anzahl der Schwarz-Weiß-Übergänge in jeder Spalte der bearbeiteten Aufnahme. Ein Übergang wird hierbei als solcher gewertet, sobald ein Unterschied von einem Grauwert zwischen einem Maximum und einem Minimum oder umgekehrt besteht. Da die Anzahl der Übergänge auf dem analogen Pattern bekannt ist, kann die letzte Spalte der Aufnahme, in der noch alle Übergänge enthalten sind, dabei leicht bestimmt werden (vgl. Abbildung 8). Wenn in jeder Spalte alle Übergänge auf dem gesamten Pattern erkannt werden, muss entweder ein neues Pattern mit einer geringeren Linienbreite erstellt oder der Abstand vom Pattern zur Kamera erhöht werden, denn die geometrische Auflösung ist dann noch nicht erreicht.

Wird die Grenze jedoch erreicht, so bestimmt die Funktion die Breite einer Linie in dieser Spalte in Pixeln, indem die Grenzen des Patterns bestimmt, und die Anzahl an Pixeln im Pattern durch die Gesamtzahl an Pixeln in der gewünschten Richtung geteilt werden – für unseren Scanner also 640 für die

	Cycles/Pixel	LW/PH
mean	0.45	429
stdev	0.02	16

Abbildung 9: Untersuchung der vertikalen geometrischen Auflösung

horizontale und 480 für die vertikale Richtung. Der Wert Cycles pro Pixel folgt direkt aus der Breite einer Linie in Pixeln l :

$$cpp = \frac{1}{2\ l} \tag{5}$$

Da die Größe des FOV in einem bestimmten Abstand d bekannt ist (s.o.), kann aus der Breite einer Linie in Pixeln die entsprechende Breite l in mm und der Wert LW/PH berechnet werden[5].

Tabelle 9 zeigt das Ergebnis zur vertikalen geometrischen Auflösung aus 18 Aufnahmen eines mit „GeoResPattern“ erzeugten Testpatterns. Die Lp-Frequenz auf dem Pattern stieg von 0.7 lp/mm auf 1.0 lp/mm an; es wurde mit dem Scanner in einem Abstand von 1.60 m aufgenommen. Es ergab sich eine geometrische Auflösung von 0.45 Cycles/Pixel. Wenn man die Standardabweichung aus den 18 Messungen betrachtet, ist dieses Ergebnis offensichtlich robuster als im Versuch mit dem USAF-Target.

2.3 Die „Modulation Transfer Function“

2.3.1 Definition der MTF

Ein in der Wissenschaft sehr verbreiteter Ansatz zur Evaluation optischer Systemer ist die Analyse im Frequenzraum. Arbeiten zu diesen Methoden existieren bereits seit den 40ern, als Duffieux und andere Fourier-Methoden auf optische Systeme anwendeten. Im Bezug auf die Untersuchung der Auflösung hat sich die sog. „Modulation Transfer Function“ (MTF) durchgesetzt. Die MTF wird auch „Spatial Frequency Response“ (SFR) genannt. Dainty und Shaw [4] behandeln dieses Thema sehr ausführlich, aufgrund des Alters

[5] s. Gleichung 2

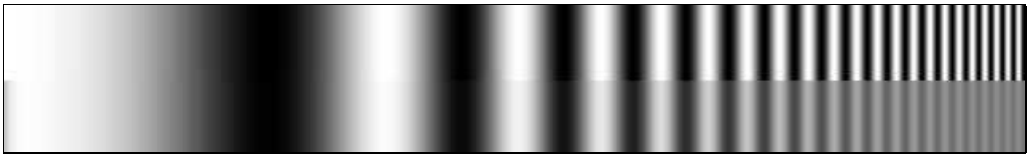


Abbildung 10: Kontrast eines sinusförmigen Musters (obere Hälfte) im Verglich zum Kontrast einer Aufnahme (untere Hälfte) in Abhängigkeit der räumlichen Frequenz des Musters. Mit zunehmender Frequenz verschlechtert sich der Kontrast in der Aufnahme.

der Arbeit aber nur hinsichtlich analoger Photographie. Dieselben Methoden werden jedoch heute auch auf die digitale Photographie angewandt, da sie weit verbreitet und vor allem standardisiert sind; im besonderen sei hier auf den ISO-Standard „ISO 12233:2000 Photography – Elecronic still picture cameras – Resolution measurement“ verwiesen.
Die MTF ist das Verhältnis des Kontrasts der Aufnahme eines sinusförmigen Musters zum Kontrast im Original als Funktion der räumlichen Frequenz des Musters (vgl. Abbildung 10). Je höher die räumliche Frequenz des Muster ist, desto schlechter wird der Kontrast in der Aufnahme. Sei C_0 der Kontrast der Aufnahme bei einer niedrigen räumlichen Frequenz; dieser Wert entspricht dem Kontrast im Original, und wird berechnet als

$$C_0 = \frac{I^0_{max} - I^0_{min}}{I^0_{max} + I^0_{min}}$$

wobei I^0_{max} und I^0_{min} die Intensitäten einer schwarzen und weißen Fläche bei niedriger Frequenz sind. Dementsprechend sei C_ω der Kontrast der Aufnahme bei der Frequenz ω mit

$$C_\omega = \frac{I^\omega_{max} - I^\omega_{min}}{I^\omega_{max} + I^\omega_{min}}$$

Hierbei ist I^ω_{max} bzw. I^ω_{min} die maximale bzw. minimale Intensität bei der Frequenz ω. Die MTF ergibt sich dann als

$$MTF\,(\omega) = \frac{C_\omega}{C_0} \tag{6}$$

Die Frequenz ω wird für analoge Systeme in lp/mm angegeben, bei digitalen

wieder in Cycles/Pixel bzw. LW/PH. Per Definition ist die MTF bei niedriger Frequenz 1, mit steigender Frequenz nimmt sie bis zum Wert 0 ab.
Ein Vorteil der MTF ist, dass sie nicht nur ein Limit der Auflösung angibt, sondern auch das Verhalten des Systems bis zu dieser Auflösung beschreibt, es kann also im Gegensatz zu Versuchen mit Linebarpatterns (wie oben) mehr Information gewonnen werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass mit der MTF sowohl einzelne Komponenten eines optischen Systems als auch das gesamte System untersucht werden kann. Dabei ergibt sich die MTF eines Systems aus der Multiplikation der MTF der Komponeneten.

2.3.2 Der ISO 12233 Standard und der „Slanted Edge“ Test

Neben der Verwendung von sinusförmigen Mustern zur Bestimmung der MTF gibt es auch andere Ansätze, wie z.B. durch die Aufnahme eines zufälligen Rauschens oder einer leicht gekippten Kante [6](engl: slanted edge). Da letztere Methode nur ein einfaches Testmuster erfordert, wird sie in dem vorher erwähnten ISO Standard 12233 zur Bestimmung der Auflösung von Digitalkameras vorgeschlagen. Die MTF kann als Betrag der Fouriertransformation der sog. „line spread function“ (LSF) definiert werden. Die LSF ist die Antwort eines (linearen) optischen Systems auf einen infinitesimal dünne Linie und ist das Derivat der sog. „edge spread function“ (ESF), somit kann sie aus der Aufnahme einer Kante hergeleitet werden. Diese Definition der MTF ist äqivalent zur Definition über den Kontrast eines sinusförmigen Musters [4], vorausgesetzt dass gewisse Versuchsbedingungen eingehalten werden [6].
Abbildung 11 zeigt ein Flow-chart Diagramm des Algorithmus, der im ISO-Standard präsentiert wird. Der Benutzer selektiert aus der Aufnahme einer Kante einen rechtwinkligen Bereich (ROI), der die Kante enthält. Mit Hilfe der „opto-electronic conversion function“ (OECF), deren Messung im ISO-Standard ISO 14524 beschrieben wird, werden die Intensitätswerte der Aufnahme linearisiert. Danach wird für jede Zeile das Derivat der Bilddaten berechnet, indem ein „$1/2, +1/2$“ FIR Filter angewendet wird, und der Schwerpunkt dieses Derivats bestimmt. Aus den Schwerpunkten jeder Zeile

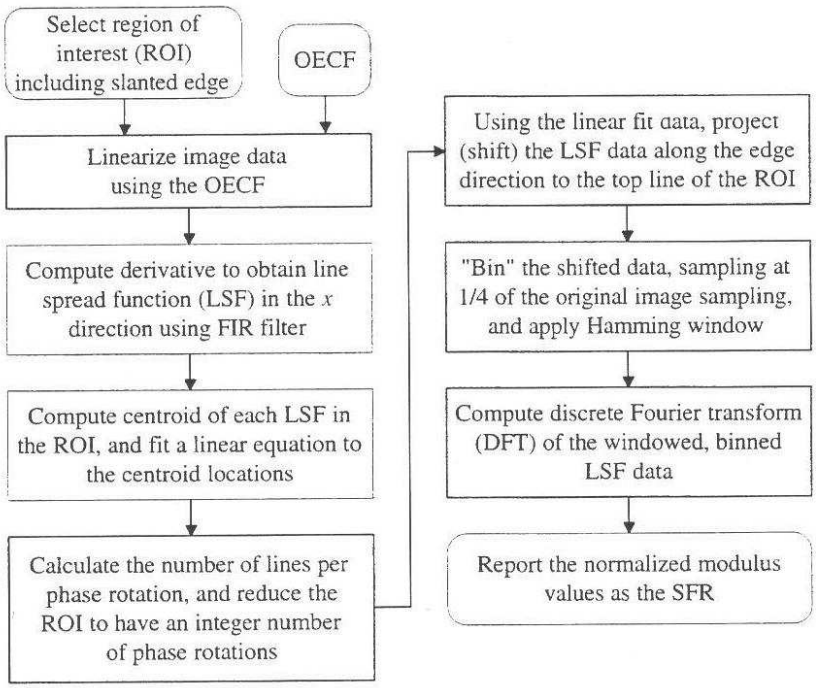
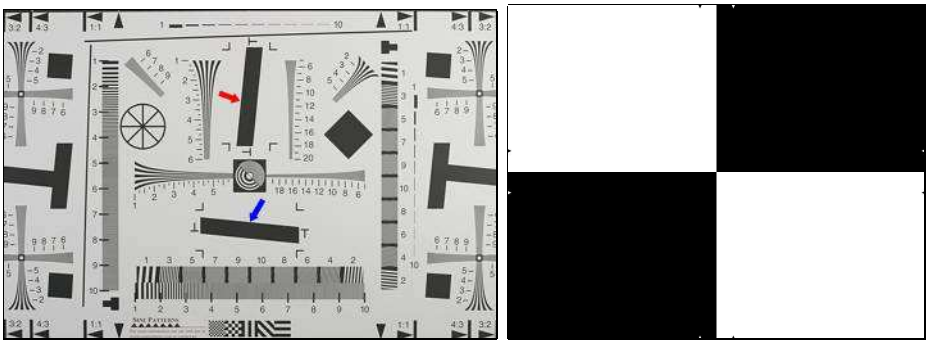


Abbildung 11: Der ISO 12233 Algorithmus (aus [5])

wird eine Ausgleichsgerade berechnet. Durch eine geeignete Reduktion des ROI, die Verschiebung der differenzierten Daten entlang der Ausgleichsgeraden und ein „Binning“ in 4 Bins entsteht eine einzige, supergesampelte, zusammengesetze LSF. Um Rauscheffekte zu vermindern, wird noch ein sog. „Hamming Window“ auf die LSF angewendet. Die SFR/MTF ist dann der normalisierte Betrag der diskreten Fourier-Transformation der LSF.
Es gibt bereits mehrere Softwaresysteme, die diesen Algorithmus implementieren, wie z.B. ein Plugin für Adobe Photoshop. Ich habe für meinen Versuch die Betaversion des Programms „Imatest“ [6] verwendet. Dieses Programm wurde von Norman Koren, Colorado, implementiert, der im übrigen eine sehr ausführliche Website[7] zum Thema digitale Photographie und insbesondere der MTF erstellt hat. Imatest implementiert ebenfalls den ISO 12233 Algorithmus.

[6] www.imatest.com
[7] www.normankoren.com/Tutorials/MTF.html



(a) ISO Resolution Test Chart

(b) Ein einfaches Slanted Edge Pattern

Abbildung 12: Patterns zur Bestimmung der MTF mit dem slanted-edge Test

Abbildung 12(a) zeigt die ISO 12233 „Resolution Test Chart“, mit der viele Features einer Digitalkamera gemessen werden können, diese ist allerdings relativ teuer. Zur Analyse der MTF mit dem Slanted-Edge Test genügt auch ein einfacheres Pattern; Abbildung 12(b) zeigt ein solches Pattern, das im Imatest Programmpaket enthalten ist. Dieses wird nun so aufgehängt, dass die Kanten um ca. 5° gekippt sind. Genaue Anweisungen zur Aufnahme des Patterns sind auf der Imatest documentation Website[8] zu finden. Im Programm wird eine Region der Aufnahme ausgewählt, welche die zu untersuchende Kante beinhaltet. Nach der Berechnung wird ein Plot der MTF gegen die räumliche Frequenz ausgegeben. Die visuelle limitierende Auflösung wird normalerweise als die räumliche Frequenz definiert, bei der die MTF den Wert 0.5 annimmt. Dieser Wert wird auch als MTF50 bezeichnet.
Abbildung 13 zeigt die von Imatest errechnete MTF-Kurve bei einer Untersuchung der vertikalen Auflösung. Die schwarze Kurve ist aussagekräftig, wenn nur die Linse einer Kamera untersucht wird. Dagegen wird die rote Kurve betrachtet, wenn es um die Analyse eines Systems geht, da bei der Berechnung dieser Kurve der Einfluss von standardisierten Schärfe-Algorithmen miteinbezogen wird. Es ist davon auszugehen, dass auch der Minolta VI-900 solche Algorithmen einsetzt. Die MTF50 betrug in diesem Versuch 0.44 Cy-

[8] www.imatest.com/docs.html

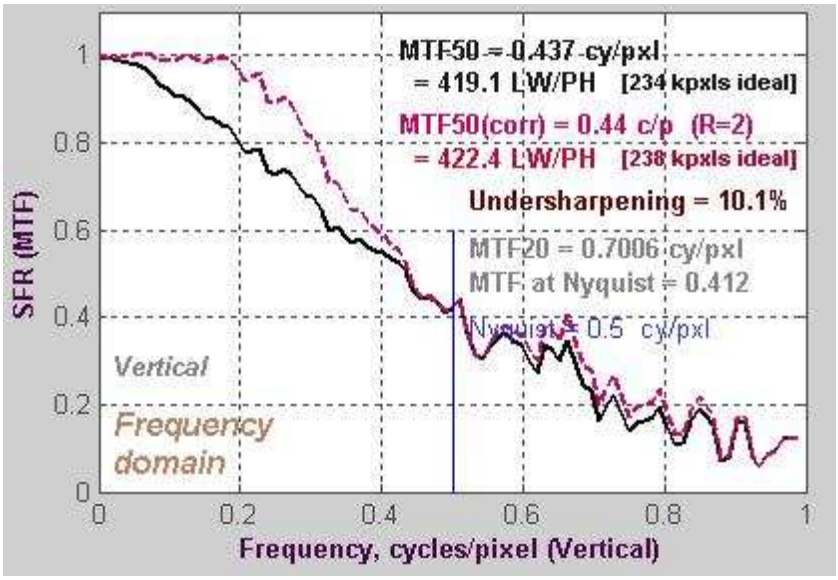


Abbildung 13: MTF-Kurve bei einer Untersuchung der vertikalen Auflösung mit Imatest

cles/Pixel bzw. 422 LW/PH. Leider trat beim Versuch der in [7] beschriebene Effekt „Clipping“ auf, da die zur Verfügung stehende Beleuchtung zu schwach war. Dieser Effekt kann zu Messungenauigkeiten der MTF führen. Das Ergebnis stimmt jedoch sehr gut mit dem Ergebnis des vorherigen Abschnitts überein, ist also dennoch plausibel.

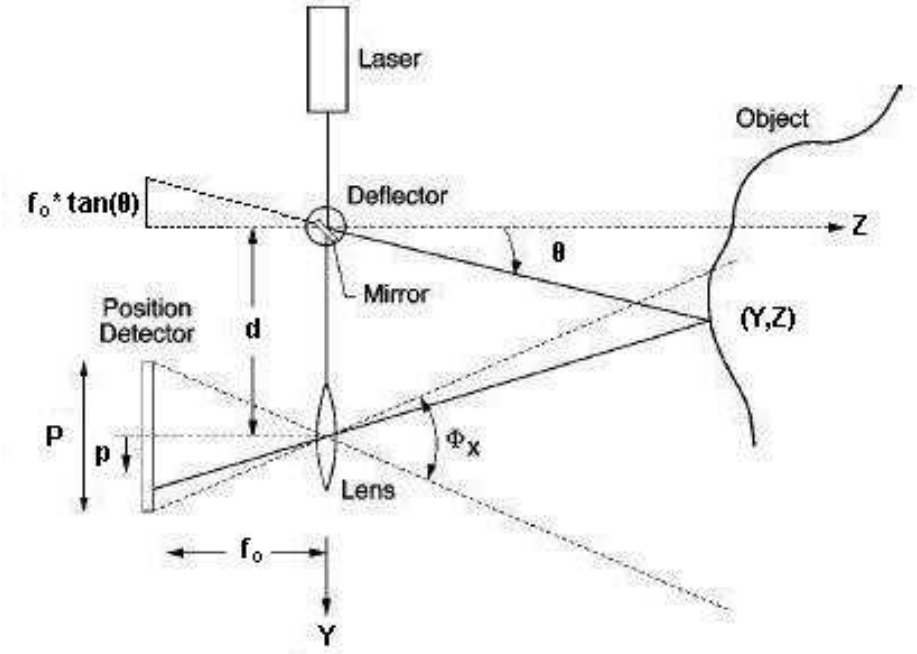


Abbildung 14: einfaches geometrisches Modell der Triangulation (aus [10], modifiziert)

3 Die Entfernungsmessung

3.1 Das Triangulationsprinzip

Bei der Benutztung eines Laser Range Scanners erhält man als ersten Output eine dreidimensionale Punktwolke aus den gesampelten Oberflächenpunkten. Dabei werden x- und y- Koordinaten meistens aus den Deflektionswinkeln der Spiegel bestimmt, durch die der Laserstrahl abgelenkt wird. Da beim Minolta VI 900 jedoch eine Laserlinie emittiert wird, wird hier nur die y-Koordinate aus dem Ablennkungswinkel des Spiegels ermittelt, die x-Koordinate ergibt sich aus der Spalte des CCD-Feldes, die gerade betrachtet wird. Wie aber erhält man die z-Koordinate? Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, die „Triangulation“ für kürzere Entfernungen und die „Time-Of-Flight Methode“ für Größere. Da der VI 900 nur die Triangulationsmethode benutzt, gehe ich nicht weiter auf die Time-Of-Flight Methode ein.

Abbildung 14 zeigt ein einfaches Modell der Triangulation. Der Laserstrahl wird emittiert, trifft das Objekt und wird von diesem reflektiert. Das reflektierte Laserlicht wird dann durch die Linse auf das CCD-Feld abgebildet, wodurch die Position p des Laserstrahl auf diesem bestimmt werden kann. Die für die Entfernungsmessung relevanten Parameter des Scanners sind bekannt. Diese Parameter sind die Entfernung der Linse zum CCD-Feld f_0 (die Brennweite), der Abstand zwischen Laserquelle und Linse d (die sogenannte „Camera Baseline“) und der Ablenkungswinkel des Laserstrahls θ. Die Entfernung des gesampelten Punktes kann dann mit Hilfe des Strahlensatzes berechnet werden:

$$\frac{z}{z + f_0} = \frac{d}{p + d + f_0 \tan\theta}$$

und somit

$$z = \frac{df_0}{p + f_0 \tan\theta} \tag{7}$$

Aus der Entfernung des Punktes und der Information über Deflektionswinkel und die aktuellen Spalte des CCD-Feldes wird die interne (x, y, z)-Koordinate des Punktes im Koordinatensystem des Scanners berechnet.

3.2 Fehlermaße und Fehlerquellen

Die Angaben der Hersteller von 3D Laserscannern über die Qualität ihrer Geräte sind in der Regel leider wenig verlässlich und nicht direkt vergleichbar. Das liegt vor allem daran, dass meist nicht genauer spezifiziert ist, wie das System begutachtet und welche Fehler analysiert wurden, außerdem fehlt es an standardisierten Verfahren. Zwar wurden schon von mehreren Wissenschaftlern und Institutionen Versuche unternommen, ein einheitliches Maß für die Qualität verschiedener Scannersysteme zu entwickeln, insgesamt scheitert dies jedoch an der Vielzahl der Systeme und der speziellen Anwendungen. Eine Testeinrichtung, mit der sämtliche Fehlerquellen untersucht werden können, ist kaum zu realisieren. Selbst für eine Pilotinstallation die nur die „allernotwendigsten“ Einrichtungen aufweist, hielten Fachleute bei einem NIST Workshop eine Investition in der Größenordnung von 300.000 bis 500.000 US$

für erforderlich [13].
Dennoch gibt es bestimmte Fehlermaße, die für die grundlegende Charakterisierung eines Laserscanners geeignet sind. Diese werden in der Literatur (relativ) einheitlich definiert und gemessen. Es folgt eine Beschreibung dieser Maße.

Auflösung ist der kleinste Unterschied in der Entfernung, der gemessen werden kann. Sie wird hauptsächlich von der Auflösung des CCD Feldes, der Quantisierung der elektrischen Signale und der Größe des Laserpunktes bzw. Breite der Laserlinie bestimmt. Böhler, Vicent und Marbs geben einen praktischen Ansatz zum qualitativen Vergleich der Auflösung mehrerer Systeme an [14]. Dies wird mit Hilfe eines dreidimensionalen Testobjekts bewerkstelligt, das einem sog. Siemensstern ähnelt. Ein entsprechendes Objekt für die geschätzte Auflösung unseres Scanners herzustellen, war leider nicht möglich.

Kanteneffekte entstehen, da der Laserpunkt bzw. die Laserlinie eine bestimmte Ausdehnung vorweist, selbst wenn der Laser gut fokussiert ist. An Kanten wird so nur ein Teil des Laserlichts reflektiert, wodurch es in deren Nähe zu stärkeren Fehlern kommt. Quantitativ sind diese Effekte sehr schwer zu messen, es ist nur ein qualitativer Vergleich mehrerer Systeme möglich [14]. Da für diese Arbeit nur ein System zur Verfügung steht, werden Kanteneffekte hier nicht behandelt.

Zufällige Fehler entstehen aufgrund verschiedener Einflussfaktoren, wie z.B. dem Speckle-Rauschen des reflektierten Laserstrahls oder dem elektrischen Rauschen des CCD-Feldes und der elektronischen Schaltkreise des Scanners. Als Fehlermaße werden das „Rauschen“ der einzelnen Punkte einer Punktwolke und die „Precision“ der Aufnahmen untersucht; letztere ist die Streuung der Ergebnisse mehrerer Messungen bei konstant bleibendem Aufbau. Die zufälligen Fehler werden ausführlich in [1] behandelt.

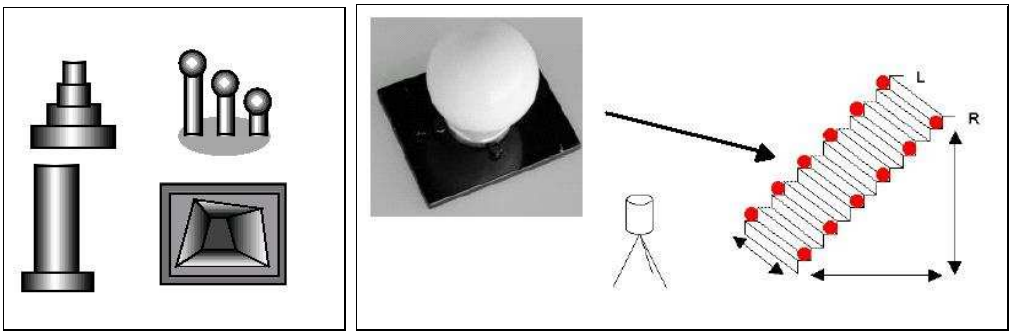
System Bias / Accuracy ist der konstante systematische Fehler, der bei jeder Messung gemacht wird. Es ist der Mittelwert, der sich ergibt, wenn man unendlich oft dieselbe (bekannte) Messgröße unter gleichbleibenden Bedingungen mißt und den wahren Wert davon abzieht. Der Bias wird vor allem durch interne technische Fehler im Aufbau und unzureichende Kalibrierung des Geräts verursacht. Einflussfaktoren sind aber auch die Geometrie und Beschaffenheit der Objektoberfläche, die Temperatur bei der Aufnahme oder die Umgebungshelligkeit. Es ist sehr schwierig, den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Accuracy auszuwerten [15].

Es gibt noch viele weitere Kriterien, nach der die Qualität eines Systems je nach geplanter Anwendung eingestuft werden kann. Dazu zählen z.B. das Verhalten des Systems auf unterschiedliche Arbeitsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Umgebungslicht), die Messgeschwindigkeit, Grösse und der Preis des Systems, oder auch der Support durch den Hersteller. All diese Faktoren können wohl kaum zusammen analysiert werden.
Im nun folgenden Abschnitt stelle ich das allgemeine Prinzip zur Messung der Accuracy eines Laserscanners und einen eigenen Versuch vor.

3.3 Accuracy

3.3.1 Allgemeine Methodik

Die prinzipielle Methode, um die Accuracy eines Laserscanners zu messen, ist in der Literatur sehr einheitlich [8]-[15]. Es werden einfache Referenzobjekte mit bekannten Oberflächenparametern gescannt, wie z.B. Flächen, Kugeln oder Zylinder. Ein Objekt bzw. die Konstellation von mehreren Objekten enthalten so mindestens einen wahren Wert, etwa den Durchmesser einer Kugel oder den Abstand zwischen zwei Kugeln. Dieser wahre Wert muss entweder von vornherein bekannt sein oder mit einem genaueren Messgerät als dem zu untersuchenden bestimmt werden. Aus der gemessenen Punktwolke des Scanners werden die Geometrien der Objekte extrapoliert und die ent-



(a) Zylinder, Kugeln und Flächen, aus [11]

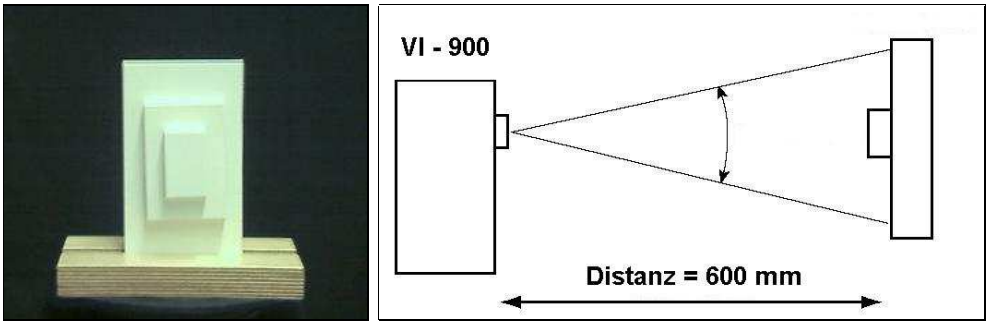
(b) Konstellation mehrerer Kugeln, aus [14]

Abbildung 15: Objekte aus der Literatur zur Bestimmung der Accuracy eines Laserscanners

sprechenden Abweichungen zum wahren Wert berechnet. Diese Abweichung ist ein Maß für die Accuracy des Systems. Abbildung 15 zeigt Beispiele für Messobjekte zur Accuracy aus verschiedenen Artikeln.
Eine andere Methode zur Bestimmung der Accuracy eines Laserscanners wird in [17] vorgestellt. Hier wird die Analyse der räumlichen Frequenzantwort durchgeführt. Der dort vorgestellte Versuch ist an die MTF-Messung von Digitalkameras (wie oben beschrieben) angelehnt. Da ich diesen Artikel jedoch erst zum Ende der Bearbeitungszeit für die Bachelorarbeit entdeckt habe, konnte ich die Methode leider nicht mehr in diese Arbeit aufnehmen.

3.3.2 Ein eigener Versuch

Der von mir durchgeführte Versuch zur Bestimmung der Accuracy in z-Richtung ist an einen Versuch angelehnt, welcher in einer Technical Note [18] beschrieben ist, die uns von der Firma Minolta zur Verfügung gestellt wurde. Es wird ein Messobjekt verwendet, das aus drei parallelen Ebenen in bekannten Abständen besteht. Von der Werkstatt der Universität Konstanz wurde das in Abbildung 16(a) dargestellte Messobjekt gefertigt. Dieses Objekt ist aus jeweils 15 mm dicken Plexiglasplatten aufgebaut, und mattweiß lackiert, um bestmögliche Reflexionseigenschaften zu garantieren. Die Dimensionen



(a) Objekt zur Bestimmung der Accuracy in z-Richtung

(b) Versuchsaufbau aus [18], modifiziert

Abbildung 16: Versuch zur Accuracy in z-Richtung

des Objekts sind so ausgelegt, dass es gerade das FOV des Scanners in 60 cm Entfernung ausfüllt. Abbildung 16(b) skizziert den Versuchsaufbau. Aus den Koordinaten der aufgenommenen Punkte der Ebenen wird je eine Ausgleichsebene berechnet. Die zwei Abstände zwischen den Ebenen werden mit dem wahren Wert 15 mm verglichen.

Für den Versuch stand mir ein Laborraum mit Klimaanlage im Physikbereich der Universität zur Verfügung, so dass eine konstante Zimmertemperatur von 20°C eingestellt werden konnte. Der Raum wurde außerdem komplett abgedunkelt, womit Störungen durch wechselnde Lichtverhältnisse zwischen einzelnen Scans ausgeschlossen werden können. Da ich einen sogenannten optischen Tisch verwenden konnte, der Vibrationen vom Boden abdämpft, ist auch der Einfluss von Erschütterungen auf den Versuchsaufbau minimiert.

Die hier präsentierten Ergebnisse stammen aus einem Versuch mit 15 Scans, wobei das Objekt 60 cm vom Scanner entfernt aufgestellt war. Mit Hilfe des Polygon Editing Tool (PET) von Minolta können nach jeder Aufnahme die Punkte der einzelnen Ebenen in das ASCII-Format exportiert werden. Die Datei enthält dann Information über die Anzahl an Punkten und die (x,y,z)-Koordinaten der selektierten Punkte. Bei der Selektion der jeweiligen Ebenen wurden die Punkte in Kantennähe weggelassen, um den Einfluss auf die Ergebnisse durch Kanteneffekte zu vermindern. Die exportierte Datei kann mit dem „load“ Befehl in Matlab eingelesen werden, nachdem die erste und letzte

Zeile, welche die Information über die Anzahl der Punkte enthalten, gelöscht wurden.
Die Matlab-Funktion „dist2plane.m“ berechnet aus je zwei der Punktwolken den Abstand zwischen den Ebenen, indem für jede Punktwolke eine Ausgleichsebene berechnet und deren Abstand zueinander bestimmt wird. Bei den 15 Aufnahmen ergab sich für den Abstand zwischen der vorderen und der mittleren Ebene ein Differenz zum wahren Wert von 0.147 mm mit einer Standardabweichung von 0.005 mm. Die Differenz für den Abstand zwischen der mittleren und der hinteren Ebene betrug 0.213 mm mit einer Standardabweichung von 0.003 mm. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass mindestens einer der tatsächlichen Abstände der Ebenen auf dem Objekt nicht exakt 15 mm betrug, und der Test damit nicht vollkommen valide ist. Der Mittelwert der Differenzen von 0.180 mm ist als Accuracy des Geräts dennoch realistisch; in der oben genannten Technical Note über den Minolta VI-910 Laserscanner wird die Accuracy in z-Richtung mit 0.1 mm angegeben, wobei davon auszugehen ist, dass die Accuracy des VI-910 im Vergleich zu unserem Gerät VI-900 verbessert wurde.

4 Schlusswort und Danksagung

Es wurden Methoden vorgestellt, um die technische und geometrische Auflösung der zweidimensionalen Texturaufnahme zu bestimmen. Die Angaben zur technische Auflösung des Minolta VI-900 von 640*480 Pixeln wurde dabei bestätigt. Die geometrische Auflösung wurde in einem Versuch mit einem Linebar-Pattern gemessen, die Analyse im Ortsraum ergab einen Wert von 0.45 Cycles/Pixel. Eine Untersuchung der Auflösung im Frequenzraum mit dem „Slanted Edge“ Test ergab mit 0.44 Cycles/Pixel fast den selben Wert. Probleme bei diesen Versuchen entstanden hauptsächlich aufgrund der mäßigen Beleuchtung im Labor, insbesondere bei der Bestimmung der MTF. Neben der Analyse der Auflösung wären die Untersuchung des Rauschens und des Tonalverhaltens bei der Bildaufnahme notwendig, um das Gerät im 2D-Bereich komplett zu charakterisieren.
Zur Analyse der 3D-Messungen wurde zuerst das Triangulationsprinzip erklärt. Es folgte eine Beschreibung der wichtigsten Fehlermaße, um einen Laserscanner zu charakterisieren. In dieser Arbeit wurde das Fehlermaß „Accuracy“ genauer erläutert und ein Versuch mit einem einfachen Referenzobjekt vorgeschlagen, um die Accuracy in z-Richtung zu bestimmen. Aufgrund von Ungenauigkeiten des Objekts ist das Ergebnis des Versuchs nicht vollkommen valide, die Accuracy wurde auf 0.18 mm geschätzt.
Aus dieser Arbeit ergaben sich im Bezug auf die 3D-Messung einige Themen, die noch untersucht werden können:

- Mit Hilfe von anderen Referenzobjekten als dem hier verwendeten könnte die Accuracy des Geräts in x- und y- Richtung, oder in beliebigen Richtungen, analysiert werden, wie z.B. mit den Objekten aus [11].

- Die Accuracy könnte auch vermittels der räumlichen Frequenzantwort bzw. der MTF bestimmt werden, wie in [17] gezeigt. Diese Methode ist an den Slanted-Edge Test für Digitalkameras angelehnt und kann auch auf 3D-Messgeräte angewendet werden. Der Vorteil liegt hierbei darin, dass die Messung weniger abhängig vom Messobjekt und den

Messbedingungen ist.

- Ein Vergleich mehrerer Geräte könnte zumindest eine qualitative Aussage über die Leistung im Bezug auf Kanteneffekte und Auflösung bringen, wie in [14] dargelegt. Da aber eine Vielzahl von Geräten mit unterschiedlichen Charakteristika, wie z.B. verschiedene Messbereiche, und Anwendungsgebieten existieren, müssten diese kategorisiert und innerhalb der Kategorien untersucht werden.

Zum Schluss möchte ich den beiden Gutachtern dieser Arbeit, Prof. Dietmar Saupe und Prof. Oliver Deussen, und meinem Betreuer Tilo Ochotta danken. Mein Dank gilt auch Uwe Mazur, Tobias Böhler und Daniel Schmidt aus dem Fachbereich Physik, die mir einen klimatisierten Laborraum überlassen und mich mit freundlicher Hilfe unterstützt haben. Ebenso möchte ich den Mitarbeitern der Werkstätten der Universität Konstanz für ihre unkomplizierte Beratung danken. Desweiteren möchte ich mich bei Norman Koren bedanken, der mir sein Programm Imatest zur Verfügung gestellt hat.

Literatur

[1] M. Bernhard: *Analyse der relativen zufälligen Fehler eines 3D-Laserrange Scanners unter besonderer Betrachtung des Specklerauschens*, Bachelorarbeit, Universität Konstanz, 2004.

[2] www.minolta-3d.com, *3D-Laserscannersysteme der Firma Minolta*

[3] www.efg2.com/Lab/ImageProcessing/TestTargets/#USAF1951

[4] J.C. Dainty, R. Shaw: *Image Science*, Academic Press, 1974.

[5] ISO 12233:2000, *Photography – Electronic still-picture cameras – Resolution measurements*

[6] P.D. Burns: *Slanted-Edge MTF for Digital Camera and Scanner Analysis*, Proc. PICS Conference, IS&T, pp. 135-138, 2000.

[7] P.D. Burns, D. Williams: *Refined Slanted-Edge Measurement for Practical Camera and Scanner Testing*, Proc PICS Conference, IS&T, pp. 191-195, 2002.

[8] P.J. Besl: *Active optical range imaging sensors*, Advances in Machine Vision, Springer Verlag, pp. 1-63, 1988.

[9] J. Paakkari and I. Moring: *Method for evaluating the performance of range imaging devices*, Proc. Industrial Applications of Optical Inspection, Metrology, and Sensing, SPIE-1821, pp. 350-356, 1992.

[10] J.-A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer, G. Godin, M. Rioux: *Active 3D Sensing*, Modelli E Metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica, University: Scola Normale Superiore, Pisa 10: pp. 22-46, 2000.

[11] S. F. El-Hakim, J.-A. Beraldin, F. Blais: *Comparative Evaluation of the Performance of Passive and Active 3D Vision Systems* Proc. SPIE Vol. 2646, pp. 14-25, 1995.

[12] www.nist.gov, *National Institute of Standards and Technology*

[13] NIST (2003): *Proceedings of the LADAR Calibration Facility Workshop*, June 12-13, 2003, NISTIR Publication 7054, Gaithersburg, USA.

[14] W. Boehler, M. Bordas Vicent, A. Marbs: *Investigating Laser Scanner Accuracy*, originally presented at the XIXth CIPA Symposium at Antalya, Turkey, Sep 30 - Oct 4, 2003.

[15] W. Böhler, A. Marbs: *Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner*, 3. Oldenburger 3D-Tage - Oldenburg, Germany, 2004.

[16] www.i3mainz.fh-mainz.de, *Institut für raumbezogene Informations- und Messtechnik, FH Mainz*

[17] M. Goesele, C. Fuchs, H. Seidel: *Accuracy of 3D range scanners by measurement of the slanted edge modulation transfer function*, 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003 Proceedings, pp 37-44, 2003.

[18] *Minolta Technical Note TNE-020*, Technische Information zum Minolta VI 910 Laserscanner

A Programme

NumPixPattern.exe

Das Program *NumPixPattern.exe* erstellt ein schwarz-weißes Linebar Pattern, mit dem die Anzahl der Pixel einer digitalen Kamera bestimmt werden kann (s. *numpix.m*). Die Anzahl der Linien erhöht sich kontinuierlich von rechts nach links, ebenso der Wert „Linienpaare pro mm“, wenn zwei unterschiedliche Werte übergeben werden. Das Pattern wird als „xfig“-Datei ausgegeben; xfig ist ein Vektor-Grafikprogramm für Linux und daher frei verfügbar. Die ausgegebene Datei kann damit in das „pdf“-Format exportiert und so plattformunabhängig ausgedruckt werden. Das Pattern wird im DIN A3 Format ausgegeben, da es größer als das Field of View der Kamera sein sollte.

- Aufruf : *NumPixPattern <lpmm left> <lpmm right> <output>*
- Argumente :
  1. lpmm left :
     Anzahl der Linienpaare pro mm auf der linken Seite des Patterns
  2. lpmm right :
     Anzahl der Linienpaare pro mm auf der rechten Seite des Patterns
  3. output :
     Pfad/Dateiname der auszugebenden xfig-Datei
- Ausgabe : Das Linebar Pattern im xfig-Format.
- Beispiel : NumPixPattern 1.0 0.6 out.fig

numpix.m

Mit Hilfe der Matlab-Funktion *numpix.m* lässt sich bestimmen, wieviele Schwarz-Weiß-Übergange in einem mit *NumPixPattern.exe* erstellten Pattern von der Kamera noch aufgelöst werden. Daraus kann man auf die technische Auflösung der Kamera schliessen.

- Aufruf : *numpix(Filename,Orientation)*
- Argumente :
  1. Filename :
     Der Pfad/Dateiname der Bilddatei (tif Format), in der die Aufnahme des Kamera gespeichert ist.

2. Orientation :
   Die Ausrichtung des Patterns. Wenn die vertikale Auflösung bestimmt werden soll, ist hier „*v*“ anzugeben, für die horizontale „*h*“.

- Ausgabe : Ein Diagramm, in dem die Anzahl der Schwarz-weiß-Übergänge aller Zeilen bzw. Spalten des Bildes dargestellt sind, je nachdem, ob die horizontale oder vertikale Auflösung untersucht wird.

- Algorithmus :

  1. Lese das Bild ein
  2. Transformiere das RGB-Bild in ein Grauwertbild
  3. Bestimme für jede Zeile/Spalte des Bildes die Anzahl der Extrema im Intesitätsverlauf und speichere diese in einem Vektor
  4. Zeichne diesen Vektor als Diagramm

GeoResPattern.exe

Das Program *GeoResPattern.exe* erstellt ein schwarz-weißes Linebar Pattern, mit dem die geometrische Auflösung einer digitalen Kamera bestimmt werden kann (s. *geores.m*). Die Anzahl der Linien ist dabei auf dem gesamten Pattern konstant, jedoch erhöht sich der Wert „Linienpaare pro mm“ kontinuierlich von rechts nach links, die Linienbreite nimmt also ab. Das Pattern wird wiederum als „xfig“-Datei ausgegeben und als „pdf“ exportiert. Das Pattern wird im DIN A4 Format ausgegeben, da es vollständig im Field of View der Kamera liegen muss.

- Aufruf : *GeoResPattern <lpmm left> <lpmm right> <output>*

- Argumente :

  1. lpmm left :
     Anzahl der Linienpaare pro mm auf der linken Seite des Patterns
  2. lpmm right :
     Anzahl der Linienpaare pro mm auf der rechten Seite des Patterns
  3. output :
     Pfad/Dateiname der auszugebenden xfig-Datei

- Ausgabe : Das Linebar Pattern im xfig-Format.

- Beispiel : GeoResPattern 1.0 0.6 out.fig

geores.m

geores.m berechnet die geometrische Auflösung eines aufgenommenen Linebarpatterns, das mit *GeoResPattern.exe* erstellt wurde. In der Aufnahme muss dazu die Fläche um das Pattern herum einheitlich weiß gefärbt werden, z.B. mit PaintShop Pro oder ähnlichen Programmen.

- Aufruf : *geores(Filename,Orientation,LNumber,Distance)*
- Argumente :
  1. Filename :
     Der Pfad/Dateiname der Bilddatei (tif Format), in der die Aufnahme des Kamera gespeichert ist.
  2. Orientation :
     Die Ausrichtung des Patterns. Wenn die vertikale Auflösung bestimmt werden soll, ist hier *'v'* anzugeben, für die horizontale *'h'*.
  3. LNumber :
     Die Anzahl der Linien auf dem Pattern. Diese ist auf dem gesamten Pattern konstant.
  4. Distance :
     Die Entfernung vom Scanner zum Pattern.
- Ausgabe : Die Linienbreite bzw. der Wert Cycles/Pixel in der Scanlinie, in der noch alle Linien aufgelöst werden, und der dazugehörige Wert LW/PH (line widths per picture height).
- Algorithmus :
  1. Lese das Bild ein
  2. Transformiere das RGB-Bild in ein Grauwertbild
  3. Bestimme für jede Zeile/Spalte des Bildes die Anzahl der Extrema im Intesitätsverlauf
  4. Bestimme dabei die letzte Zeile/Spalte, in der noch alle Linien aufglöst wurden
  5. Berechne die Breite einer Linie in dieser Zeile in Pixeln. Dazu wird die Ausdehnung des Pattern in Pixeln bestimmt und durch die Anzahl der Linien geteilt. Aus dieser Breite folgt direkt der Wert cycles/pixel
  6. Berechne aus der Pixelbreite einer Linie und der Grösse des FOV die Breite einer Linie in mm und den Wert LW/PH

dist2plane.m

dist2plane.m berechnet aus zwei Punktwolken, die ebene, parallele Flächen repräsentieren, den Abstand zwischen diesen Ebenen. Dazu werden aus einer Aufnahme des in der Arbeit vorgestellten Messobjekts die Punkte jeweils einer Ebene selektiert und mit dem im Lieferumfang des Scanners enthaltenen Polygon Editing Tool in das ASCII-Format exportiert. Nachdem die erste und letzte Zeile der exportierten Datei gelöscht wurden, kann die Punktwolke in Matlab mit dem „load“-Befehl in eine Matrix eingelesen werden, in der dann die (x,y,z)-Koordinaten der Punkte gespeichert sind. Die Funktion berechnet aus zwei dieser Matrizen je eine Ausgleichsebene und dann den Abstand zwischen diesen zwei Ebenen.

- Aufruf : *dist2plane(Plane1, Plane2)*
- Argumente :
  1. Plane1 :
     Eine Matrix, welche die (x,y,z)-Koordinaten der Punktwolke für die erste Ebene repräsentiert.
  2. Plane2 :
     Eine Matrix, welche die (x,y,z)-Koordinaten der Punktwolke für die zweite Ebene repräsentiert.
- Ausgabe : Der Abstand zwischen den zwei approximierten Ebenen.