
Computergestützte Bildgebung für eine linsenlose „Durchsicht“- Kamera

Einführung

Herkömmliche Kameras verdecken die Sicht auf das Objekt oder die Szene, die sie aufnehmen. Es ist interessant, die Möglichkeiten zur Überwindung dieser Einschränkung zu untersuchen, die Anwendungen in Fahrerassistenz-Technologien für Automobile, Augmented-Reality-Headsets usw. ermöglichen könnten. Es gab in letzter Zeit einige Versuche, dieses Ziel zu erreichen [1-4]. Eine bemerkenswerte Arbeit von Microsoft, Inc [1] verwendet eine keilförmige optische Platte (Keil-Optik), um das auf das Fenster treffende Licht gleichzeitig auf die Unterseite des Keils zu leiten und zu fokussieren. Durch die Beibehaltung der optischen Konjugation zwischen Fenster und Fensterkante kann die Keiloptik sowohl für Kamera- als auch für Projektoranwendungen verwendet werden. Allerdings ist die effektive Öffnung der Keiloptik auf die obere Fensterhälfte begrenzt, so dass die untere Fensterhälfte abgedeckt werden muss, um unerwünschtes Streulicht zu eliminieren. Ein zweiter Ansatz, der als LumiConSense [2-4] bezeichnet wird, basiert auf einem Lumineszenzkonzentrator (LC). Der LC ist eine flexible Polymerfolie, die mit grünem Fluoreszenzfarbstoff dotiert ist. Trifft ein Photon mit ausreichender Energie auf den LC, wird der Fluoreszenzfarbstoff angeregt. Ein Teil dieser Reemission wird in der LC-Folie eingefangen und zum Rand geführt, wo ein faseroptisches Bündel das Signal einfängt. Anschließend werden die Bilder rechnerisch rekonstruiert. Ein Nachteil von diesem Ansatz ist eine relativ geringe Transparenz im LC-Panel aufgrund der Absorption des fluoreszierenden Farbstoffs.

Die Autoren schlagen eine elegante Methode vor, diese Einschränkungen zu überwinden, indem sie einen konventionellen Bildsensor auf den Rand eines transparenten Fensters legen, wie in Bild 1(a) dargestellt. Die Kanten des Fensters werden mit einem reflektierenden Band abgedeckt, mit Ausnahme des Teils, der dem Bildsensor zugewandt ist. Dieser Teil der Kante ist leicht aufgeraut, wie in Bild 1(b) dargestellt. Ein kleiner Teil der Strahlen von jedem Punkt des Objekts streut von dieser rauhen Oberfläche und wird vom Sensor gesammelt. Dieses Streubild bildet daher eine Punkt-Spreizfunktion (PSF) des Systems für diesen Punkt. Zuerst wird experimentell die PSF des Systems für alle Punkte auf einem Testobjekt (eine Anordnung von LEDs, wie unten beschrieben) gemessen. Als nächstes werden Bilder von beliebigen Objekten aufgenommen. Schließlich wird das lineare inverse Problem gelöst, um das Bild eines beliebigen Objekts aus den gemessenen PSF-Daten zu rekonstruieren. Diese Idee wurde bisher ausgenutzt, um sowohl die linsenlose Fotografie [5] als auch die Mikroskopie durch eine chirurgische Nadel [6-9] zu ermöglichen.

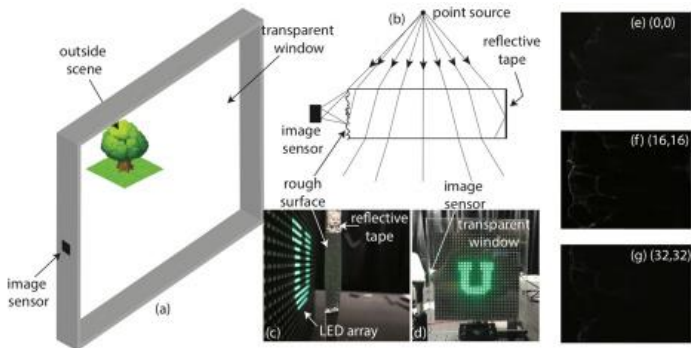


Bild 1. (a) Schema der "Durchsicht-Kamera". (b) Schematische Darstellung der Signalerfassung durch den Bildsensor. (c) Seitenansicht unseres Versuchsaufbaus ohne den Bildsensor. (d) Frontansicht des Aufbaus. Ein LED-Array wird als Kalibrier- und Testobjekt verwendet. Die Teile 1(e)-1(g) zeigen gemessene PSF-Bilder für die LED-Positionen (0,0), (16,16) und (32,32).

Der Ansatz könnte Anwendungen wie Eyetracking in Augmented-Reality-Brillen oder auf der Windschutzscheibe eines Autos ermöglichen, ohne die Sicht des Benutzers zu behindern. Darüber hinaus könnten durch die Entfernung aller Linsen ultra-kompakte und "durchsichtige" Kameras für Anwendungen ermöglicht werden, bei denen der Formfaktor wichtig ist.

Abbildung eines LED-Arrays

Fotos des Versuchsaufbaus in Seiten- und Frontansicht sind in Bild 1(c) und 1(d) dargestellt. Als Kalibrier- und Testobjekt wird ein LED-Array (SparkFun, COM-12584) verwendet. Das Fenster wurde aus Plexiglas-Acrylglas auf eine Größe von 200mm X 225mm zugeschnitten. Die Kantenflächen wurden thermisch bearbeitet, um glatte Oberflächen zu gewährleisten. Durch das Anpressen von Schleifpapier der Körnung 80 gegen die dem Bildsensor zugewandte Oberfläche wurde nach der Erwärmung die Streurauhigkeit erzeugt. Nach dem Abkühlen wurde auf allen Kantenflächen außer dem aufgerauten Teil, der dem Bildsensor zugewandt ist, reflektierendes (Aluminium-)Klebeband aufgelegt (siehe Abb. 1(c)). Es wurde ein herkömmlicher CMOS-Bildsensor (1/3" Aptina MT9V024, Pixelgröße = 6µm, 640X480 Pixel, 8 Bit) verwendet.

Die Kalibrierung wurde durch die Aufnahme des Signals auf dem Bildsensor durchgeführt, wenn nur eine einzelne LED im Array eingeschaltet war (die eine Punktquelle darstellt). Für jede LED wurden 20 Frames gemittelt, um den LED-Flackereffekt zu vermeiden und das Rauschen zu reduzieren. Dies wurde für das gesamte Array aus 32 X 32 LEDs durchgeführt, das den Bereich innerhalb der Fläche des transparenten Fensters (Diagonale = 190,5cm) darstellte. Das gesamte Umgebungslicht wurde abgeschaltet. Beispielframes für 3 verschiedene LED-Positionen sind in Abb. 1(e)-1(g) dargestellt.

Inkohärente Abbildung bedeutet, dass das Bild eines beliebigen Objekts die lineare Summe der Bilder ist, die durch seine konstituierenden Punkte gebildet werden. Wir verwenden auch einen Algorithmus mit hohem Dynamikbereich (HDR), um die nichtlineare Pixelantwort des Bildsensors zu korrigieren [10]. Anschließend kann

das Bild auf dem Sensor, \mathbf{b} als $\mathbf{b}=\mathbf{A}\mathbf{x}$ modelliert werden, wobei das Objekt \mathbf{x} in das Bild \mathbf{b} über die Kalibrierungsmatrix \mathbf{A} transformiert wird. Um \mathbf{x} wiederzugewinnen, wird ein regularisierter linearer inverser Solver verwendet [11].

Auf dem LED-Array wurden beispielhafte Testbilder angezeigt, wie die Referenzbilder in der linken Spalte von Bild 2 zeigen. Die entsprechenden Rohdaten, die auf dem Bildsensor aufgenommen wurden, sind in der mittleren Spalte dargestellt, während die rechte Spalte die entsprechenden rekonstruierten Bilder zeigt, die durch die Lösung von Gl. (2) erhalten wurden. Es ist klar, dass die vom Bildsensor erfassten Kaustikmuster genügend Informationen über das Objekt enthalten, um eine effektive Bildrekonstruktion zu ermöglichen. Für diese Experimente wurden nur die grünen LEDs und der Grünkanal des Bildsensors zur Kalibrierung und Prüfung verwendet.

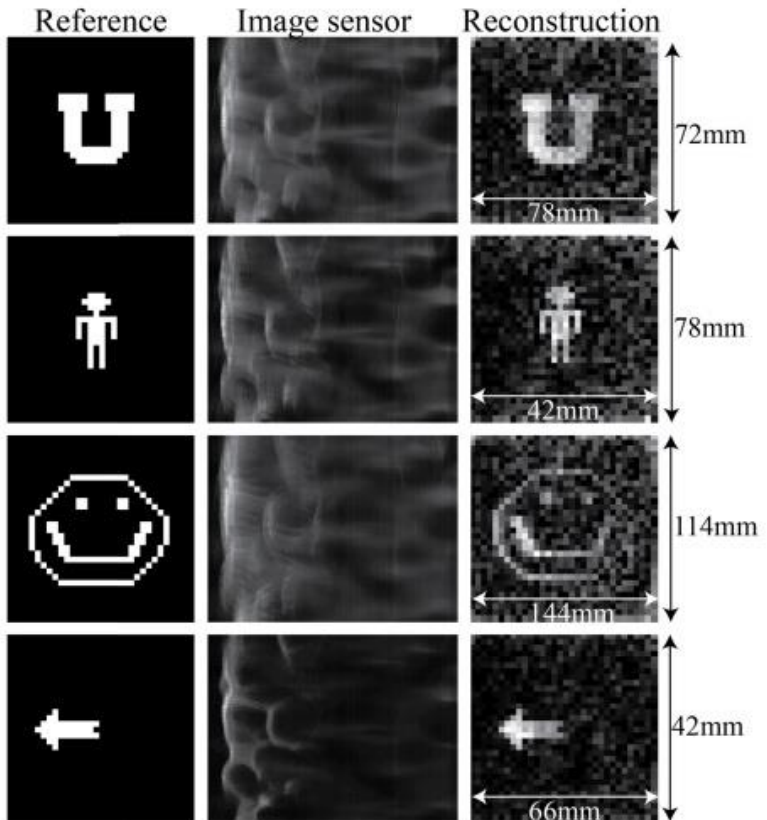


Bild 2. Experimentelle Ergebnisse von einem LED-Array. Linke Spalte: Referenzbilder auf LED-Array platziert. Mittlere Spalte: Vom Bildsensor erfasste Rohdaten (Bildgröße = 640X480 Pixel). Rechte Spalte: Rekonstruierte Bilder. Der Abstand zwischen dem LED-Array und dem Fenster betrug 150mm.

Die Kalibrierung und der Test in Bild 2 wurden mit den grünen LEDs im Array durchgeführt. Um den Einfluss der Farbe zu verstehen, wurde versucht, Bilder mit roten, blauen und weißen Farben auf dem LED-Array zu rekonstruieren. Die resultierenden Bilder sind in Bild 3 zusammengefasst. Zu beachten ist, dass die Größen des Bildvektors b , des Objekts, x und der Matrix A 640×480 Pixel, 32×32 Pixel bzw. 307.000×1024 Pixel betragen. Das in Gl. (2) dargestellte Minimierungsproblem hat eine gut etablierte geschlossene Lösung durch Singulärwertzerlegung der Kalibrierungsmatrix A nach den in [11] beschriebenen Schritten.

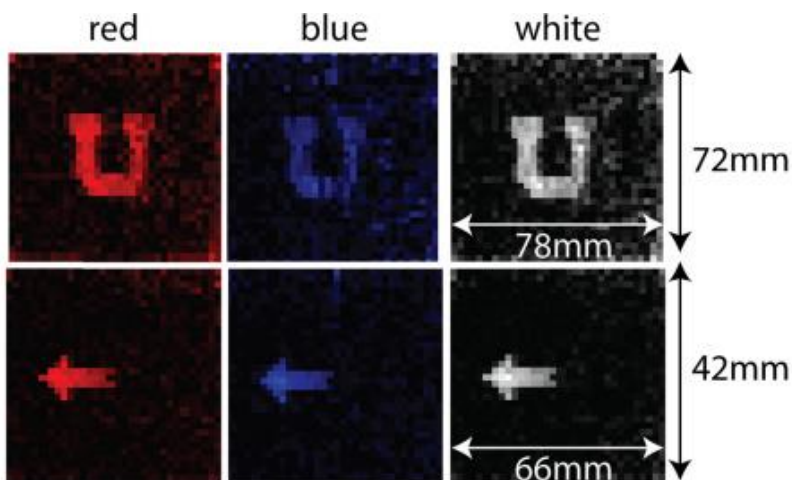


Bild 3. Experimentelle Ergebnisse eines LED-Arrays in den Farben rot, blau und weiß. Der Abstand zwischen dem LED-Array und dem Fenster betrug 150mm und die Kalibrierung wurde mit grüner Farbe durchgeführt.

Es wird erwartet, dass der Abstand zwischen dem Objekt (LED-Array) und dem transparenten Fenster eine entscheidende Rolle für die Qualität der Bildrekonstruktion spielt. Der optimale Abstand wurde empirisch ermittelt, indem in verschiedenen Abständen kalibriert und Testbilder rekonstruiert wurden. Die Ergebnisse sind in Bild 4 zusammengefasst und wir vermuten, dass der optimale Abstand etwa 150mm beträgt.

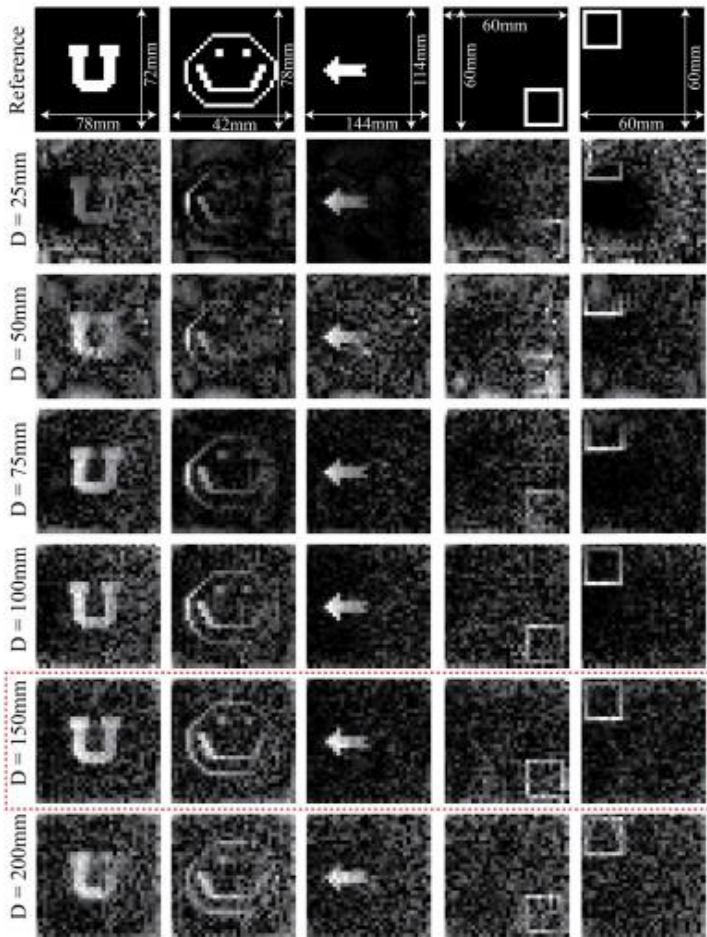


Bild 4. Optimaler Abstand zwischen Objekt und transparentem Fenster. Es werden rekonstruierte Bilder in verschiedenen Abständen gezeigt. Die Kalibrierung wurde bei jedem Abstand separat durchgeführt.

Zur weiteren Verdeutlichung der Abbildungsleistung wurden die vom Bildsensor von jedem Punkt des Objekts gesammelten Randstrahlen betrachtet (siehe Bild 8). Mit Hilfe dieser Geometrie konnte ein Satz von transzendenten Gleichungen analytisch gelöst werden, um den Akzeptanzwinkel der vom Bildsensor gesammelten Strahlen von jedem Punkt aus zu berechnen (siehe Bild 9).

Diese Analyse zeigt zunächst, dass der Akzeptanzwinkel mit zunehmendem Abstand zwischen der Objektebene und dem Fenster abnimmt. Zum anderen zeigt sie auch, dass der Akzeptanzwinkel über die Objektebene bei größeren Entfernungen gleichmäßiger ist. Daher gibt es einen Kompromiss zwischen der Größe des Objekts und dem Abstand zwischen Objekt und Fenster. Ein dritter Faktor ist eindeutig, dass bei größeren Entfernungen das Signal abnimmt. Diese drei Faktoren führen zu einer optimalen Wahl des Abstands zwischen der Objektebene und dem Fenster.

Um die Abbildungsleistung zu quantifizieren, wurde der Kontrast eines Linien-Raum-Musters gemessen, das in verschiedenen Abständen zwischen dem LED-Array und dem transparenten Fenster (hier als D bezeichnet) rekonstruiert wurde. Die Bilder aus dem Experiment sind in Bild 10 dargestellt. Der Kontrast der rekonstruierten horizontalen und vertikalen Linien-Raum-Paare ist in Bild 5(a) als Funktion D aufgetragen. Ein optimaler Wert von D ($\sim 150\text{mm}$), bei dem der Kontrast maximal ist, kann beobachtet werden.

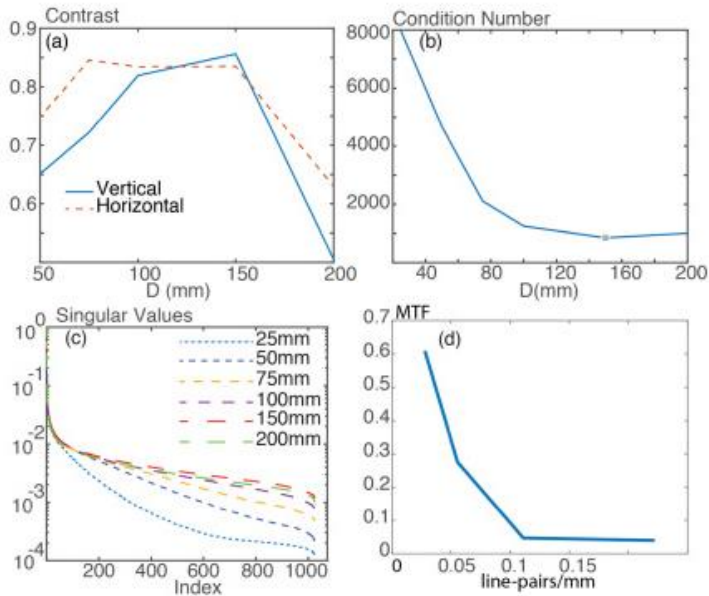


Bild 5. Quantitative Analyse des optimalen Abstands zwischen Objekt und transparentem Fenster. (a) Der Kontrast eines Linien-Raum-Musters und (b) die Konditionszahl von A werden als Funktion von D , dem Abstand zwischen dem LED-Array und dem transparenten Fenster, aufgetragen. (c) Singuläre Werte von A als Funktion von D . (d) Modulationsübertragungsfunktion unter Verwendung von Zeilenabstmustern auf einem LCD bei $D = 150\text{mm}$.

Wir können dies weiter analysieren, indem wir die Singulärwertzerlegung (SVD) von A bei jedem Wert von D durchführen, was zu einem Singulärwertvektor s führt. Die Komplexität der Lösung des inversen Problems ist umgekehrt proportional zur Konditionszahl der PSF-Matrix A , die als das Verhältnis des ersten und letzten Elements von s definiert ist [12,13]. Bild 5(b) zeigt, dass die Konditionszahl mit zunehmendem D bis etwa 150mm abnimmt, darüber hinaus ist sie stabil. Die Singulärwertvektoren bei verschiedenen Werten von D sind in Bild 5(c) dargestellt und zeigen, dass die Abklingrate der Singulärwerte

am langsamsten ist, wenn $D \sim 150\text{mm}$ ist, was ein weiteres Maß für die Einfachheit der Inversion der PSF-Matrix ist, A [14].

Schließlich wurde auch die Modulationstransferfunktion (MTF) des Systems gemessen, indem, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, Zeilenraummuster verschiedener Perioden mit einem Flüssigkristalldisplay (LCD) abgebildet wurden. Diese Daten, die in Bild 5(d) dargestellt sind, zeigen, dass die Auflösung des Systems etwa 0.1 Linienpaare/mm für $D = 150\text{mm}$ beträgt.

Abbildung einer Flüssigkristallanzeige (LCD)

Um die Allgemeingültigkeit des Ansatzes zu demonstrieren, wurde als nächstes das LED-Array durch ein herkömmliches Flüssigkristalldisplay (LCD) eines Smartphones ersetzt. Ein Foto des Versuchsaufbaus ist in Bild 6(a) dargestellt. Verschiedene Bilder wurden auf dem LCD angezeigt und die entsprechenden Daten auf dem Bildsensor erfasst. Der Abstand zwischen dem LCD und dem transparenten Fenster betrug 150mm und die in diesem Abstand über das LED-Array (wie zuvor beschrieben) erhaltene Kalibrierungsmatrix wurde für Bildrekonstruktionen verwendet.

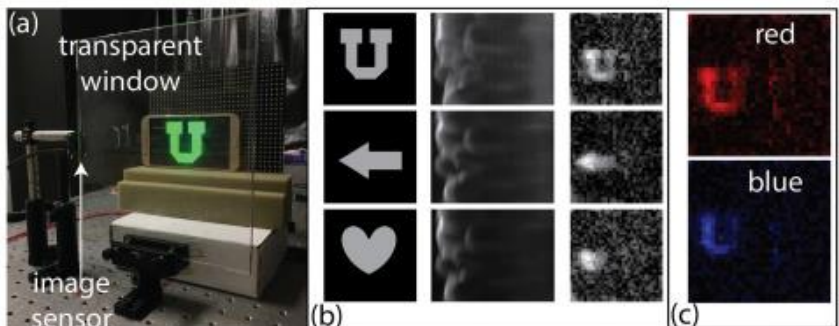


Bild 6. Abbildung einer LCD-Anzeige. (a) Fotografie unseres Aufbaus. (b) Grüne Bilder wurden auf dem LCD (linke Spalte) angezeigt, auf dem Bildsensor (mittlere Spalte) aufgenommen und rekonstruiert (rechte Spalte). (c) Bilder in roter und blauer Farbe wurden auf dem LCD angezeigt, auf dem Bildsensor aufgenommen und rekonstruiert.

Das vom Bildsensor von jedem Punkt des Objekts gesammelte Signal kann quantitativ analysiert werden, indem man die Randstrahlen betrachtet, wie in Bild 7 dargestellt. Der Akzeptanzwinkel jedes Punktes kann dabei analytisch mit dem in Bild 7 beschriebenen Gleichungssystem berechnet werden.

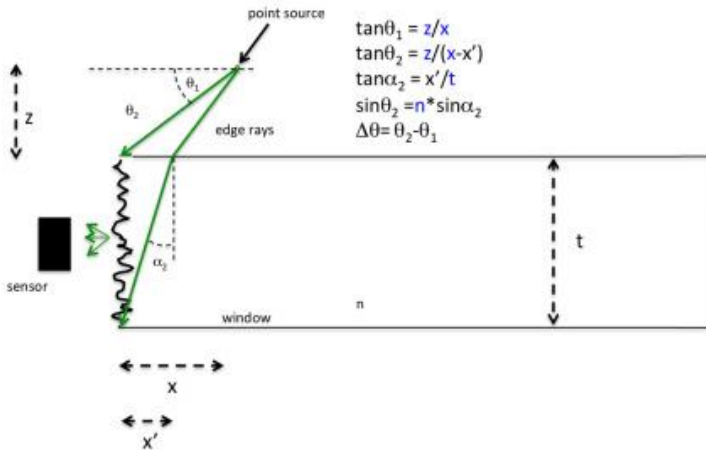


Bild 7. Modell zur Berechnung des Akzeptanzwinkels ($\Delta\theta$) des Objektpunktes.

Der berechnete Akzeptanzwinkel ($\Delta\theta$) in Abhängigkeit von der Objektlage (x) ist in Bild 8 für verschiedene Entfernungen (z) zusammengefasst. Die bei $z=25\text{mm}$ auftretende scharfe Spitze von $\Delta\theta$ impliziert, dass nur ein kleiner Teil des Objekts ein signifikantes Signal beiträgt, was wiederum bedeutet, dass nur eine geringe Anzahl von Objektpunkten rekonstruiert wird. Mit zunehmendem z flacht sich $\Delta\theta$ in Abhängigkeit von der Lage in der Objektebene ab, so dass ein größeres Objekt rekonstruiert werden kann. Dieses Modell berücksichtigt jedoch nicht die Tatsache, dass die von jedem Strahl getragene Leistung quadratisch mit der Weglänge abnimmt, was bedeutet, dass bei größerem z auch der Signalbeitrag von jedem Punkt abnimmt. Daher gibt es einen Kompromiss zwischen der Qualität der Bildrekonstruktion (bestimmt

durch das Signal-Rausch-Verhältnis) und der Größe des zu rekonstruierenden Objekts (ein effektives Sichtfeld der Kamera). Dies wird durch die in Bild 4 zusammengefassten Experimente bestätigt, aus denen wir $z=150\text{mm}$ als Optimum wählen.

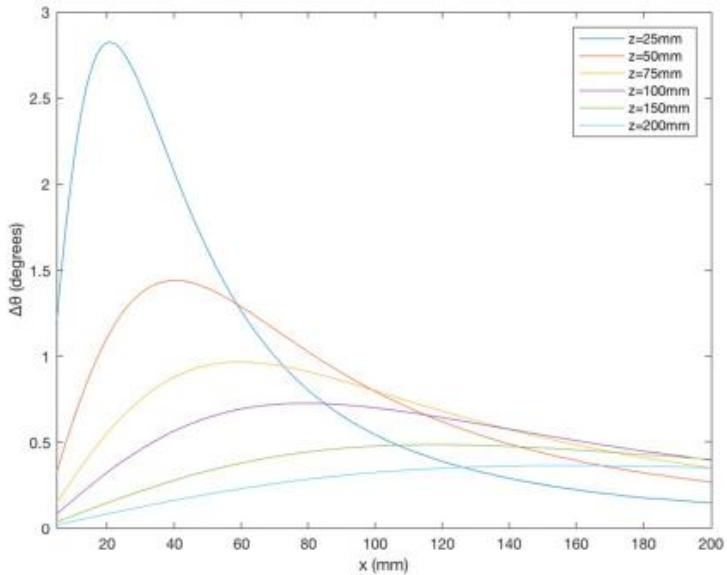


Bild 8. Akzeptanzwinkel eines Objektpunktes in Abhängigkeit von seiner Lage in der 2D (XZ)-Ebene.

Bild 9 zeigt eine einfache Darstellung des Streuprozesses. Im äußersten linken Fall, wo kein Fenster vorhanden ist, verfehlen die meisten Lichtstrahlen eines Objektpunktes den Akzeptanzkegel (grün dargestellt) der Sensorpixel. Im Falle eines glatten Fensters wird ein Großteil der Strahlen total-intern in das Fenster reflektiert und erreicht wiederum nicht die Sensorpixel. Durch die raue Oberfläche, die dem Sensor zugewandt ist, entsteht eine frustrierte Totalreflexion, die den Durchlasswinkel des Lichts (idealerweise in einen isotropen Kegel) so verändert, dass ein größerer Teil des

Licht innerhalb des Akzeptanzwinkels der Sensorpixel liegt. Diese Ergebnisse wurden durch die Experimente bestätigt.

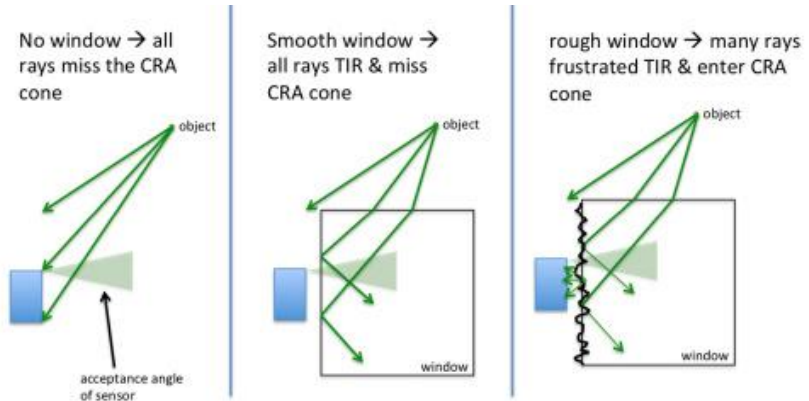


Bild 9. Schematische Darstellung der Rolle der rauen Oberfläche zur Erhöhung des Signals auf dem Sensor. CRA steht für Chief Ray Angle (oder Akzeptanzwinkel) des Sensorpixels.

Zusammenfassung

Herkömmliche Kameras verdecken die Szene, die aufgenommen wird. Es wird beschrieben, wie ein Bildsensor (ohne Objektiv) auf den Rand eines transparenten Fensters gelegt wird und generieren Bilder des durch dieses Fenster gesehenen Objekts. Dies wird zum einen durch die Sammlung des Streulichts durch den Bildsensor ermöglicht, zum anderen durch die Lösung eines inversen Problems, das den Lichtstreuungsprozess darstellt. Dadurch konnten einfache Bilder erstellt werden und eine räumliche Auflösung von ca. 0,1 Linienpaaren/mm bei einem Objekt Abstand von 150mm mit einer Tiefenschärfe von mindestens 10mm erreicht werden. Weiterhin wird die Abbildung von zwei Arten von Objekten gezeigt: ein LED-Array und ein konventioneller LCD-Bildschirm.

Originalveröffentlichung: Ganghun Kim and Rajesh Menon

Optics Express Vol. 26, Issue 18, pp. 22826-22836 (2018)

Übersetzung und redaktionelle Bearbeitung: Dr.-Ing. Anna Prenzel