



BEUTH HOCHSCHULE
FÜR TECHNIK
BERLIN

University of Applied Sciences

Wissenschaftliches Arbeiten WS 12/13

Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera

Autor:	Steffen Buder
Matrikelnr.:	772923
Institution:	Beuth Hochschule für Technik Berlin
Erstellt am:	03.11.2012
Version:	0.1
Datum:	28. November 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Thema und Aufgabenstellung	2
1.2	Aufbau der Arbeit	2
1.3	Aufbau des Papers	2
2	Fachliches Umfeld	3
2.1	2Dameratechnik	3
2.2	Lichtfeld und plenoptische Funktion	3
2.3	Plenoptische Kamera	5
3	Detaillausarbeitung	8
3.1	Hardware Implementierung	9
3.2	Software Implementierung	11
3.2.1	Algorithmik	11
3.3	Diskussion	11
4	Fazit	12
	Glossar	13

1 Einleitung

1.1 Thema und Aufgabenstellung

Thema dieser Arbeit ist es das Paper **Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera** Ng u. a. [2005] abzuhandeln und alle Grundlagen zu schaffen den Inhalt dieser Arbeit zu verstehen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird das Paper inhaltlich kurz beschrieben. Anschließend sollen die Grundlagen für das technische Verständnis der Thematik geschaffen werden, sodass abschließend die detaillierte Beschreibung des Papers erfolgen kann.

1.3 Aufbau des Papers

Das zugrundeliegende Paper beinhaltet die Beschreibung einer Implementierung einer plenoptischen Kamera die auf die Größe einer mit der Hand bedienbaren Kamera bezieht. Anfangs wird das technische Verständnis für eine solche Kamera vermittelt und anschließend werden die Implementierung und Resultate beschrieben. Die gleiche Vorgehensweise wird auch in dieser Arbeit Anwendung finden.

2 Fachliches Umfeld

Im folgenden Kapitel sollen die Grundlagen für das Verständnis des zugrunde liegenden Papers Ng u. a. [2005] geschaffen werden. Das beinhaltet die Beschreibung heutiger gewöhnlicher Kameras sowie die Klärung von Fachbegriffen. Es folgen möglichst verständliche Definitionen von Lichtfeld und plenoptischer Fotografie.

2.1 2D Kameratechnik

Die heutige Kameratechnik hat sich im Grunde genommen seit ihrer Erfindung Mitte des 19. Jahrhunderts Wikipedia [2012a], wenn man von den Grundelementen ausgeht, kaum verändert. Das sind ein *Objektiv* zum Sammeln des einfallenden Lichts auf die kleinere *Bildebene*, welche unterschiedlich repräsentiert werden kann, wie bspw. analoger Film (Halbformat, Kleinbild, Mittelformat usw.) oder Bildsensor in der digitalen Fotografie. Für die Begrenzung des einfallenden Lichts ist die Blende verantwortlich, welche sich im Linsensystem, sprich Objektiv, befindet. Abbildung 1 soll dieses Zusammenspiel der Komponenten verdeutlichen.

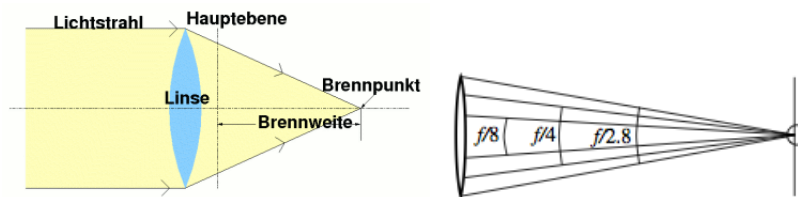


Abbildung 1: Brennweite
Quelle: Bild Link

Die Abbildung zeigt im linken Bild das einfallende Licht was vom Objektiv (stark vereinfacht dargestellt) im Brennpunkt (Bildebene) gebündelt wird. Das rechte Bild zeigt die Begrenzung des einfallenden Lichts durch die Blende.

Unter anderem hat die Blende Einfluss auf die Schärfentiefe. Je größer die Blendenzahl ist desto größer wird der Bereich indem Objekte scharf sind.

Diese drei Elemente bilden die Grundlage für das Sammeln des Lichts in der Fototechnik und für das Verständnis einer plenoptischen Kamera bzw. Integraler Fotografie. Um das Foto letztendlich auf den Film oder den Bildsensor zu bringen spielen dann noch die Größen Belichtungszeit und Empfindlichkeit des Sensors oder Film (angegeben als ISO oder ASA).

2.2 Lichtfeld und plenoptische Funktion

Das Lichtfeld und die plenoptische Funktion sind zwei Begriffe, die im Prinzip das Gleiche beschreiben, bzw. wird das Lichtfeld mit der plenoptischen Funktion beschrieben.

Um die plenoptische Funktion und das Lichtfeld zu verstehen hilft es die Strahldichte zu verstehen. Diese drückt die Strahlungsintensität (Watt) eines Punktes auf dem strahlenden Körper abhängig von seiner Richtung aus. Dieser Grundgedanke geht darauf zurück, dass die von einem Punkt ausgehende Strahlung auf einer Fläche unterschiedlich ist und auch in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich stark ist. Um also die Strahlungsintensität nicht einfach nur als konstanten Wert zu betrachten, werden die Verhältnisse mit der Fläche und der Richtung miteinbezogen um diese Abhängigkeiten der Strahlungsintensität zu erfassen. Abbildung 2 ist die visuelle Darstellung der Strahldichte.

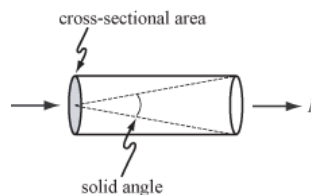


Abbildung 2: Strahldichte
Quelle: Bild Link

Die plenoptische Funktion ist also die Strahldichte entlang von Lichtstrahlen im Raum, da räumliche Parameter diese Funktion beschreiben. Das heißt, dass für die Strahldichte eines Strahls die Position, ein dreidimensionaler Vektor und die Richtung, ausgedrückt durch zwei Winkel, erforderlich sind und somit eine fünfdimensionale Funktion ergeben.

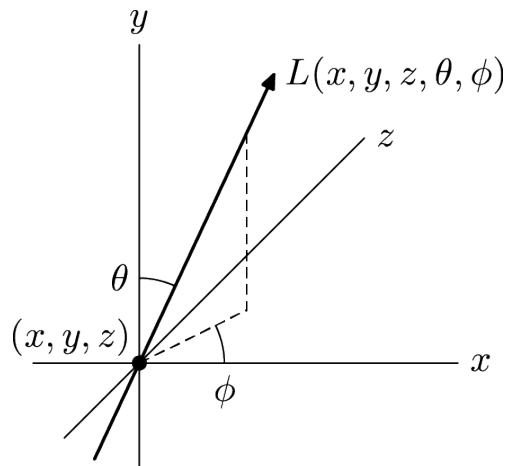


Abbildung 3: Plenoptische Funktion
Quelle: Bild Link

Bildet man das Integral über eine Menge von Vektoren (Strahldichtevektoren) erhält man die Bestrahlungsstärke E , also die Leistung (Watt) pro Quadratmeter.

Diese Betrachtung von solchen Vektoren nimmt man üblicherweise innerhalb eines begrenzten Raumes vor. Ist das der Fall spricht man vom sogenannten Lichtfeld. Diese Begrenzung kann aber beliebig gewählt werden (s. auch Perwaß u. Wietzke [2010]). Üblicherweise ist das eine zwei Ebenenbetrachtung, wie auch für plenoptische Kameras. Das führt dazu, dass oft auch vom 4D-Lichtfeld gesprochen wird, da nun von einer uv -Ebene und einer st -Ebene ausgegangen wird und alle Strahlen erfasst, die die beiden Ebenen schneiden und der Strahl nun mit 4 Parametern beschrieben werden kann, einer uv -Koordinate und einer st -Koordinate. Parallel zu den Ebenen verlaufende Strahlen werden in diesem Lichtfeld nicht erfasst.

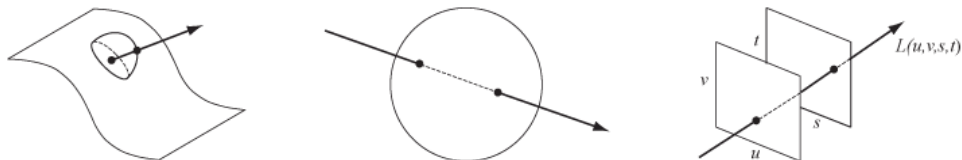


Abbildung 4: Verschiedene Arten Lichtfelder Lichtfeld
Quelle: Bild Link

Wikipedia [2012b]

2.3 Plenoptische Kamera

Das Prinzip von plenoptischen Kameras wurde bereits 1908 von Gabriel Lippmann [1908] beschrieben. Seine Version einer solchen Kamera bestand aus mehreren Objektiven Linden [2012]. Damals, als digitale Fotografie noch nicht geboren war, konnten die Vorteile einer solchen plenoptischen Kamera noch nicht im vollen Umfang genutzt werden, da die Zusammenführung der Einzelbilder so nicht ohne Weiteres möglich war und zum Anderen die Größe der Einzelteile dazu führte, dass eine solche Kamera in einem großen Aufbau resultierte. Die Idee wurde über die Jahre des Öfteren wieder aufgegriffen, aber erst seit einigen Jahren ist es technisch möglich eine solche Kamera auf eine handhabbare Größe zu fertigen und die nötige Rechenleistung für einen vertretbaren Preis aufzubringen.

Eine plenoptische Kamera erfasst das Lichtfeld eines Bildes, d. h. das ausgehend von einem Punkt von der Hauptebene einer Kamera die Strahldichte dieses Strahls erfasst wird. In modernen Lichtfeldkameras wird dies erreicht indem die Lichtstrahlen, die durch *ein* Objektiv gehen, nochmals durch ein Mikrolinsenarray gebrochen werden. Das ist vergleichbar mit einem Motiv bzw. Bild, was aus verschiedenen Perspektiven gemacht wird. Jede Linse erzeugt nochmal ein Teilbild eines Bereiches des Ursprungsbildes und das aus verschiedenen Perspektiven. Somit werden die Bereiche unter den Mikrolinsen gleich Bilder mit leichtem Versatz produzieren. Zusammengefügt zu einem Einzelbild ergibt das ein Bild mit hoher Tiefeninformation, also zusätzliche Positions- und Richtungsinformationen. Es kommen demnach die Konzepte in Bezug auf das Lichtfeld zum Tragen. Die Idee dahinter ist eigentlich recht einfach und gar nicht so weit hergeholt, da der menschliche Sehapparat auch nicht anders funktioniert. Allgemein setzt räumliches Sehen voraus, dass mindestens zwei Augen vorhanden sind. Das Gehirn setzt diese beiden Bilder dann zu einem Gesamtbild zusammen. Nichts anderes macht eine plenoptische Kamera.

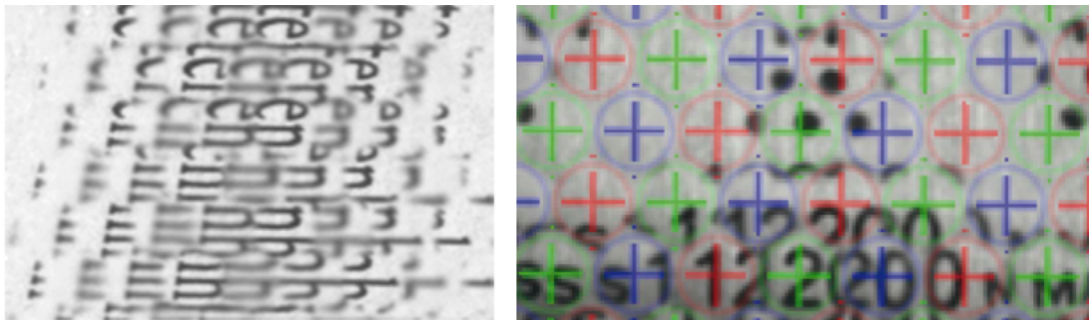


Abbildung 5: Rohbild
Quelle: Perwaß u. Wietzke [2010]

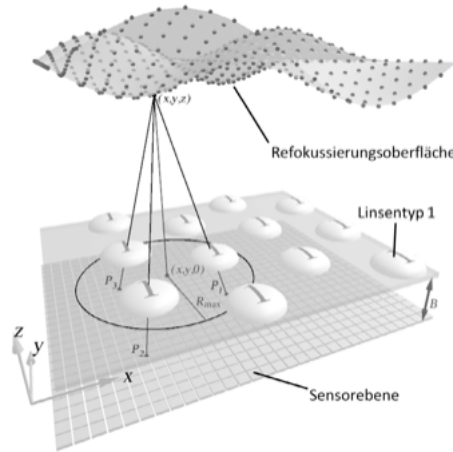


Abbildung 6: Mikrolinsendarstellung
Quelle: Perwaß u. Wietzke [2010]

Abbildung 6 zeigt die Aufzeichnung eines Punktes mit seinem Lichtfeld. Diese Darstellung eignet sich sehr gut für das Verständnis der Tiefeninformationsermittlung und der Aufzeichnung eines Punktes auf der uv-Ebene durch mehrere Mikrolinsen und somit auf verschiedenen Pixeln des Bildsensors.

Eine sehr gute Beschreibung für die Refokussierung des Bildes auf die gewünschte uv-Ebene liefert das Paper der Firma Raytrix:

“Um nun den Grau- oder Farbwert des virtuellen Punktes (x,y,z) zu berechnen, wobei die z-Koordinate die Fokusebene beschreibt, müssen lediglich die Projektionsstrahlen durch die Zentren der Mikrolinsen des für diesen Fokusbereich zuständigen Mikrolinsentyps berechnet werden. Die Schnittpunkte der Projektionsstrahlen mit der Sensorebene ergeben dann die Positionen der Bildpunkte, aus denen der resultierende Farbwert berechnet wird, z.B. über den Mittelwert.” Perwaß u. Wietzke [2010]

Diese Herangehensweise kann der Abbildung 6 entnommen werden. Die uv-Ebene ist hier eine beliebige Oberfläche und soll zeigen, dass es nicht immer eine flache Ebene sein muss.

Mit einer solchen Kamera werden im Grunde genommen 3D-Bilder aufgezeichnet. Daraus können Bilder mit einer sehr hohen Schärfentiefe mit weit offener Blende erzeugt werden. Auch ein Fokussieren der Kamera entfällt. Mit einer solchen Aufnahme kann auch die Fokusebene im Nachhinein angepasst werden (s. auch Linden [2012]). Die 3D-Information wird durch die Strahldichte erfasst, d.h. dass ein Bereich des Bildes aus unterschiedlichen Perspektiven erfasst wird und somit ausgehend von einem Punkt auf unterschiedlichen Mikrolinsen unterschiedliche Strahlungsrichtungen des von diesem Punkt ausgehenden Lichts erfasst werden.

Durch die zusätzliche Tiefeninformation ergeben sich also mehrere Vorteile. Die Szene wird 3-dimensional erfasst und das kann mit weit geöffneter Blende erfolgen. Die Lichtempfindlichkeit des Bildsensors (ISO-Wert) kann reduziert werden. Das ist vergleichbar mit analogen Filmen, welche auch eine Empfindlichkeit besitzen. Und genauso wie Filme leiden auch heutige Bildsensoren an einem erhöhten Bildrauschen, wenn die Empfindlichkeit erhöht wird. Mit einer plenoptischen Kamera kann aufgrund des starken Lichteinflusses bei weit offener Blende die Lichtempfindlichkeit und somit das Bildrauschen vermindert werden.

Durch die Richtungsinformation der einfallenden Strahlen kann die Fokusebene sowie die Schärfentiefe nachträglich verändert werden. Dabei spricht man vom Anpassen der virtuellen uv-Ebene. Desweiteren kann auch der Blickwinkel nachträglich geändert werden.



Abbildung 7: Lytro Lichtfeldkamera
Quelle: Bild Link Wikipedia [2012c]

Momentan gibt es zwei Unternehmen, welche sich der Herstellung von Lichtfeldkameras widmen. Das erste Unternehmen, war das Kieler Unternehmen Raytrix, das diese Art von Kamera für Industriekunden herstellt. Seit 2012 widmet sich auch das amerikanische Unternehmen Lytro, dessen Gründer Ren Ng ein Autor des Papers ist, mit der Herstellung solcher Kameras mit Fokus auf die Zielgruppe der Privatanwender.

Abbildung 7 zeigt eine moderne Lichtfeldkamera der Firma Lytro.

3 Detailausarbeitung

Der in Ng u. a. [2005] beschriebene Aufbau einer plenoptischen Kamera soll im folgenden Kapitel im Detail beschrieben werden und mit einer Diskussion und weiterführender Literatur abgeschlossen werden. Der Inhalt dieses Papers beschreibt im Wesentlichen die Implementierung einer plenoptischen Kamera und schafft wie auch im vorigen Kapitel dieser Arbeit grob die Grundlagen für das Verständnis der Technik. Das Gehäuse der im Rahmen dieser Arbeit (darunter auch die Entwicklung der Algorithmen zur Refokussierung bspw.) entstandenen Kamera.

Die Motivation dieser an der Stanford University entstandenen Arbeit liegt wahrscheinlich an dem vor ca. 20 Jahren aufkommenden Interesse an solchen Kameras, aber der erst seit wenigen Jahren wirklichen Machbarkeit dieser, da Bildsensoren immer höher auflösen, Rechenleistung immer günstiger und die Fertigung von Mikrolinsen immer kleiner wird. Adelson und John Y. A. Wang haben bereits 1992 eine plenoptische Kamera gebaut Adelson u. Wang [1992], was im Grunde genommen die Vorlage für das zu Grunde liegende Paper war.

Der eigentliche Fokus der Arbeit, bei der Verarbeitung der Lichtfeldaufnahmen, lag auf der Refokussierung des Bildes, also der nachträglichen Anpassung der Schärfentiefe, sprich ein Verschieben der virtuellen uv-Ebene. Abbildung 8 soll das verdeutlichen.

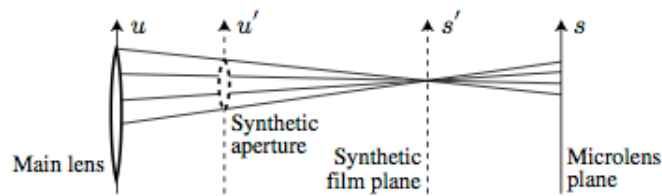


Abbildung 8: Darstellung der virtuellen uv-Ebene
Quelle: Ng u. a. [2005]

3.1 Hardware Implementierung

Für die Kamera wurde eine Contex 645 Mittelformatkamera, um einen Bildsensor verwenden zu können, der groß genug ist, da ein Bildpunkt auf dem Ursprungsbild durch die Mikrolinsen mehrere Pixel einnehmen. Der im Versuchsaufbau verwendete Abstand zum Mikrolinsenarray ist genau die Brennweite des verwendeten Objektivs. Jede Mikrolinse deckt einen Bereich von 12x12 Pixel auf dem Bildsensor ab, was die Genauigkeit der Messung des Lichtfeldes beeinflusst. Insgesamt werden 296x296 Mikrolinsen verwendet, die zusammen einen Bereich von 4000x4000 Pixel abdecken.

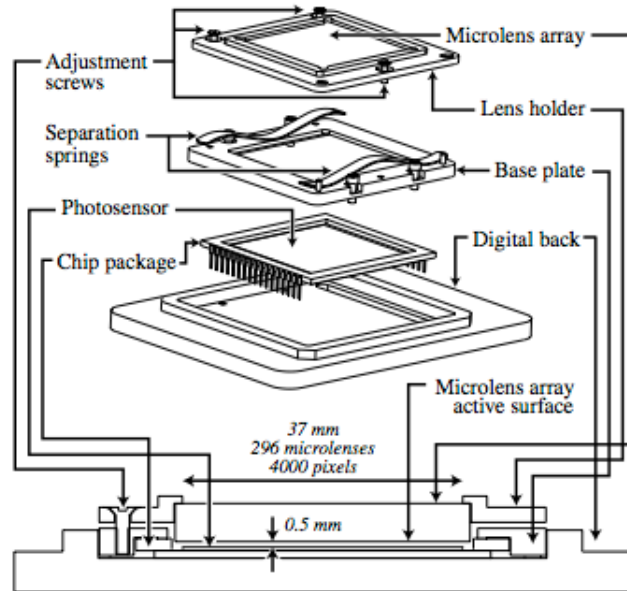
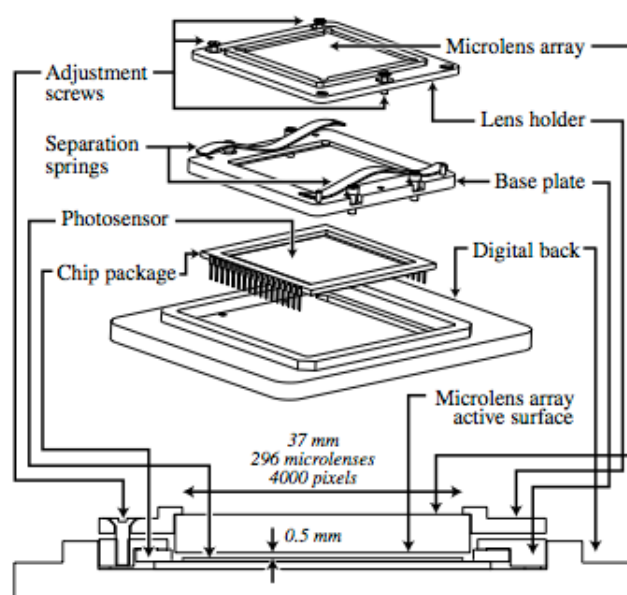
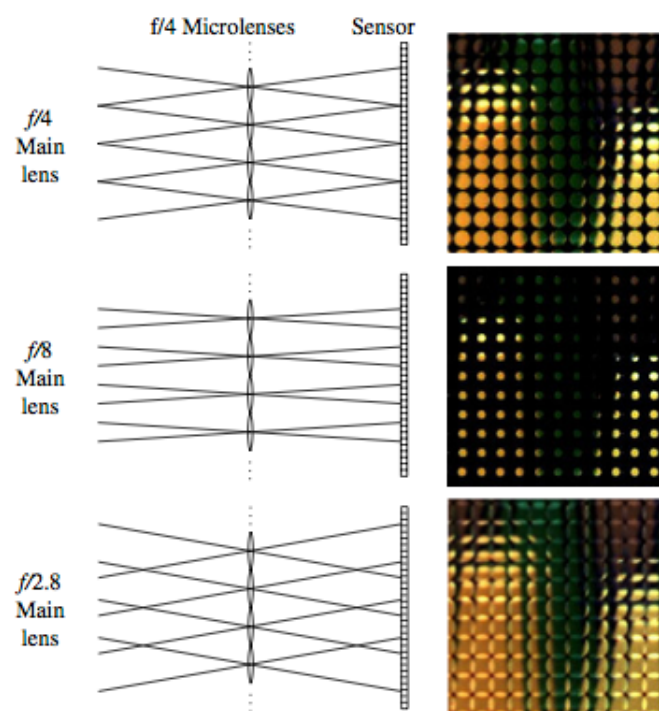


Abbildung 11 zeigt den Aufbau der Bildebene dem Mikrolinsenarray, darunter eine Zwischenplatte, um den Abstand zwischen Bildsensor und Mikrolinsenarray justieren zu können und dem Bildsensor, was zusammen auf der digitalen Rückwand der Kamera angebracht wird.

Die Einstellungen der Blenden von Hauptlinse und denen der Mikrolinsen musste für den Aufbau übereinstimmend gewählt werden um den Bereich, den die Mikrolinsen auf dem Bildsensor abdecken, weder überlappen zu lassen noch zu stark einzuschränken. Abbildung 10 illustriert diesen Effekt.



3.2 Software Implementierung

Die vereinfachte Darstellung der Refokussierung wurde schon im Abschnitt 2.3 erläutert. In den folgenden Abschnitten soll näher auf die im Paper beschriebene Software Implementierung eingegangen werden.

Die mit der im Rahmen der Arbeit Ng u. a. [2005] entstandenen Aufnahmen haben wie schon im Abschnitt 2.3 erklärt, dass im Prinzip aus mehreren Perspektiven auf gewisse Bereiche geschaut wird. Das Erzeugen eines Bildes, also das Auswählen von Pixeln unter einer Mikrolinse mit gewissen Einstellungsparametern, speziell in Bezug auf das Verschieben der Fokusebene, ist die Refokussierung, was durch gewisse Algorithmen erzielt werden kann.

3.2.1 Algorithmik

Für eine reine Abstandsbestimmung zieht man stereoskopische Messverfahren heran (trigonometrische Parallaxe) somit ist Refokussierung

Die allgemeine Refokussierung wurde bereits beschrieben (s. Kapitel 2.3), die in der im Paper beschriebenen Arbeit angewendete Formel sieht wie folgt aus:

$$E(s, t) = Lu, v, u + \mathbb{E} \pm, v + \mathbb{E} \pm dud; \quad (1)$$

Wobei die s' und t' die variablen Elemente sind. Letztendlich dreht es sich um dabei um die Bestimmung des Farbwertes für eine gegebene uv-Koordinate und einer selbst gewählten z -Koordinate, was das Verschieben der Ebene ausdrückt.

Hinweis: Gleichung ist noch nicht korrekt.

3.3 Diskussion

Die abschließende Diskussion geht auf die Resultate des Versuchs ein und erklärt beispielsweise den Verlust der theoretischen Refokussierung gegenüber den in den Versuchen erzielten Ergebnissen. Zu erwarten wäre eine Steigerung der Schärfentiefe um den Faktor 12, da die Anzahl der Pixel, die eine Mikrolinse abbildet über die Breite 12 ist. Theoretisch heißt das, dass eine virtuelle Blende nach der Refokussierung von 45 hätte erreicht werden müssen. Praktisch wurde aber nur eine Steigerung um den Faktor 6 erzielt (Blende 22), was u.a. darin begründet liegt, dass hinter jeder Blende auch Beugung des Lichts auftritt, da sich Licht u.a. wellenartig ausbreitet, was der geometrischen Optik widerspricht, auf dessen Grundlagen die Algorithmik beruht. In der Arbeit ist dieser Effekt hinter den Mikrolinsen aufgetreten. Das hat zur Folge, dass ein Blur-Effekt auftritt und somit die nachträgliche Refokussierung beschränkt.

Die abschließende eigene Bewertung der Arbeit zeigt noch einmal wofür sich eine solche Kamera eignet und was es für die konventionelle Fotografie bedeuten würde. Zu dem was schon erwähnt wurde (beliebige Anpassung der Schärfe, Bilder mit hohem Lichteinfluss aufzeichnen) und aus dem Paper hervorgeht soll hier nochmal der 3D-Aspekt hervorgehoben werden, was im Paper Ng u. a. [2005] nur bedingt Erwähnung fand und auch nicht Ziel der Arbeit war. Durch die 3 dimensionale Information des Lichtfelds sind Anwendungen wie etwa die Änderung der Perspektive, Entfernungsmessung und sogar Tiefenstreckung und -stauchung, der Effekt bei dem der Hintergrund scheinbar näher rückt, interessant

Eine Integralkamera kann auch Auswirkungen auf den Objektivbau haben, Chromatische Aberration und Vignettierung

4 Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Kenntnisse über die Technologie und den Stand der Forschung in diesem Bereich haben gezeigt, dass wir erst am Anfang der Entwicklung solcher Kameras sind und dies die Fotografie, so wie wir sie jetzt kennen grundlegend verändern könnte. Die Firma Raytrix schreibt in ihrem Paper Perwaß u. Wietzke [2010] aus dem Jahr 2010 über die Resultate einer anderen Position des Mikrolinsenarrays. Die im Paper Ng u. a. [2005] dargestellte Form einer Integralkamera positioniert das Mikrolinsenarray auf der eigentlichen Bildebene, also im Brennpunkt des Objektivs, was dazu führt, dass das resultierende, refokusierte Bild eine Auflösung, die gleich der Anzahl der Mikrolinsen ist, erreicht. Eine Veränderung der Position kann eine größere Auflösung für das resultierende Bild bedeuten. Aufgrund der aus vorherigen Arbeiten gezogenen Erkenntnisse schlägt die Firma Raytrix eine modifizierte Version einer plenoptischen Kamera vor, bei der Mikrolinsen mit unterschiedlichen Brennweiten verwendet werden, um so den Schärfentiefebereich noch weiter auszudehnen. Auf der Internetpräsenz der Firma sieht man auch verstärkt die Anwendung für 3-dimensionale Aufnahmen und somit auch dynamische Anpassung der Betrachterposition, was leider nicht im Fokus der Arbeit der Stanford University Ng u. a. [2005] lag. Durch derartige Optimierungsversuche wird deutlich, dass die Technik noch am Anfang steht. Die Auflösung der resultierenden Bilder ist noch zu klein und schränkt die Benutzung stark ein. Fotografen werden wohl vorher nicht zu solchen Kameras greifen, da kommerzielle Geräte, wie das der Firma Lytro, zwar Bilder in High Definition (HD)-Qualität, was in etwa einem Megapixel entspricht, liefern, das aber vielen nicht ausreicht, um Bilder verlustfrei auf eine Größe jenseits von A6 zu vergrößern. Somit bleibt der Anwendungsbereich, zumindest für den Privatanwender, vorerst auf dynamische Bilder beschränkt. Anders sieht es bei den Modellen der Firma Raytrix aus. Es gibt eine weitaus größere Modellauswahl mit höheren Auflösungen, allerdings sind alle Preise auf der Seite nur auf Anfrage.

Es bleibt also abzuwarten wie sich diese Technik entwickelt und ob sie breiten Zuspruch findet und somit die Fotografie revolutionieren wird. Auf der Seite von Raytrix kann zumindest schonmal ein faszinierender Eindruck von dem gewonnen werden was uns vielleicht in Zukunft erwartet.

Glossar

Bestrahlungsstärke E

englisch irradiance; Die Bestrahlungsstärke ist die Leistung einer Lichtquelle die auf eine Fläche trifft in Abhängigkeit der Größe dieser Fläche und wird in Watt pro Quadratmeter angegeben. .

Blendenzahl

Die Blendenzahl beschreibt das Verhältnis von der Brennweite und Durchmesser der Kreisfläche des eintreffenden Lichts..

Brennweite

Die Brennweite ist der Abstand der Hauptebene des Linsensystems und dem Brennpunkt. Für gewöhnlich wird diese in Millimeter angegeben..

Lichtfeld

Das Lichtfeld ist eine Menge von Lichtstrahlen innerhalb eines begrenzten Raumes, welches die Strahldichte über diese Strahlen beschreibt..

Plenoptische Funktion

Funktion zur Beschreibung der Strahldichte von Lichtstrahlen in einem Teil des Raumes..

Strahldichte

englisch radiance; Die Strahldichte L beschreibt die von einem Punkt ausgehende Strahlung abhängig von der Richtung des Strahls und wird in Watt pro Steradian pro Quadratmeter gemessen..

Abbildungsverzeichnis

1	Brennweite	3
2	Strahldichte	3
3	Plenoptische Funktion	4
4	Lichtfelder	4
5	Rohbild	5
6	Mikrolinsen	6
7	Lytro Lichtfeldkamera	7
8	Virtuelle uv-Ebene	8
9	Ver $\sqrt{\text{nderteBildebene}}$	9
10	$\sqrt{\text{übereinstimmendeBlendenzahl}}$	10
11	Ver $\sqrt{\text{nderteBildebene}}$	10

Literatur

- [Adelson u. Wang 1992] ADELSON, Edward H. ; WANG, John Y.: Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera / Massachusetts Institute of Technology. 1992. – Forschungsbericht
- [LightField-Forum 2012] LIGHTFIELD-FORUM: *LightField-Forum*. <http://lightfield-forum.com/lightfeld-features/>. Version: 2012, Abruf: 26.11.2012
- [Linden 2012] LINDEN, Marcus: *Lichtfeldfotografie; Schärfe für alle und alles*. <http://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/lytro-lichtfeldkamera-im-test-a-838935.html>. Version: 2012, Abruf: 16.11.2012
- [Lippmann 1908] LIPPMANN, Gabriel: Epreuves reversible donnant la sensation du relief. 1908. – Forschungsbericht
- [Ng u. a. 2005] NG, Ren ; LEVOY, Marc ; BRÉDIF, Mathieu ; DUVAL, Gene ; HOROWITZ, Mark ; HANRAHAN, Pat: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera / Stanford University and Duval Design. 2005. – Forschungsbericht
- [Perwaß u. Wietzke 2010] PERWASS, Christian ; WIETZKE, Lennart: Mikrolinsen-basierte 4D-Lichtfeldkameras zur räumlichen Bilderfassung durch ein einziges Objektiv in einer Aufnahme / Raytrix GmbH, Kiel. 2010. – Forschungsbericht
- [Wang 1997] WANG, John Y. A.: *Plenoptic Camera*. <http://persci.mit.edu/demos/jwang/plenoptic/plenoptic.html>. Version: 1997, Abruf: 15.11.2012
- [Wikipedia 2012a] WIKIPEDIA: *Fotoapparat*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Fotoapparat>. Version: 2012, Abruf: 16.11.2012
- [Wikipedia 2012b] WIKIPEDIA: *Lichtfeld*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtfeld>. Version: 2012, Abruf: 16.11.2012
- [Wikipedia 2012c] WIKIPEDIA: *Light-field camera*. http://en.wikipedia.org/wiki/Light-field_camera. Version: 2012, Abruf: 15.11.2012