

Ein laser- und computergestütztes Verfahren zur
photogrammetrischen Vermessung von Geschossflugbahnen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Uwe Chalupka

aus Leipzig

Hamburg 2014

Tag der mündlichen Prüfung : 21. November 2014

Hauptreferent : Prof. Dr. -Ing. habil. H. Rothe,
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Korreferent : Prof. Dr. -Ing. habil. M. Weiß,
Technische Universität Ilmenau

Dieses Dokument wurde mit dem Textsatzsystem L^AT_EX 2_ε unter Verwendung von MiK_TE_X Version 2.9 erstellt und mit freundlicher Unterstützung der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg gedruckt.

Schriftenreihe Laboratorium Mess- und Informationstechnik

Band 10/2014

Uwe Chalupka

**Ein laser- und computergestütztes Verfahren zur
photogrammetrischen Vermessung von
Geschossflugbahnen**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3278-9

ISSN 1613-4427

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

*Was du mir sagst, das vergesse ich.
Was du mir zeigst, daran erinnere ich mich.
Was du mich tun lässt, das verstehe ich.*

Konfuzius
551–479 v. Chr.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mess- und Informationstechnik (Institut für Automatisierungstechnik) der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein Dank gilt insbesondere dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hendrik Rothe, für die Förderung der Arbeit, den steten wissenschaftlichen Gedankenaustausch und die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Weiß danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Ein großer Dank geht ebenfalls an meinen ehemaligen Kollegen Cornelius Hahlweg für die wertvollen fachlichen Anregungen sowie an die Herren Dietrich Friemel, Wolfgang Kletz und Wolfgang Schmidt für die großartige Unterstützung bei der Beschaffung von Material und die hervorragende Umsetzung benötigter Konstruktionen. Ebenso möchte ich Vadim Dvoskin und Holger Gutzmann meinen Dank für die Unterstützung der Arbeit im Rahmen ihrer Diplom- und Bachelorarbeit aussprechen.

Ich bedanke mich bei meinen Kollegen und ehemaligen Kollegen (in alphabetischer Reihenfolge) André Brahmman, Lothar Butsch, Nadine Cinar, Maria Epp, Markus Graswald, Martin Gruhlke, Matthias Knapp, Steffen Köhler, Peter Kossebau, Oliver Kröning, Alexander Kuhrt, Torben Meinert, Reiner Muchow, Kristóf Nagy, Arash Ramezani, Christian Recknagel und Ilya Shaydurov für die zahlreichen Diskussionen, Anregungen und die überaus angenehme sowie freundschaftliche Zusammenarbeit.

Für die organisatorische als auch tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der praktischen Versuche der Arbeit danke ich gesondert den Herren Holger Gutzmann, Lutz Lorenzen und Kristóf Nagy. In diesem Kontext möchte ich mich ebenfalls beim Team der Waffenburg Zingst sowie bei den Mitarbeitern der Geschäftsfelder 420 und 520 der Wehrtechnischen Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91) in Meppen für die sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken.

Meiner Familie, meiner Freundin und meinen Freunden danke ich für die moralische Unterstützung und das Verständnis für die während der Anfertigung der Arbeit erfahrene Reduktion gesellschaftlichen Miteinanders.

Schließlich, aber nicht zuletzt danke ich Kai Schöne sowie meinem Vater für das Lektorat der Arbeit.

Uwe Chalupka, Hamburg im November 2014

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Konzeption eines Verfahrens zur photogrammetrischen Vermessung von Geschossflugbahnen. Diese Art ballistischer Messverfahren existiert bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts, wurde jedoch aufgrund der Fortschritte in der Radartechnik Mitte jenen Jahrhunderts nicht mehr angewendet und weiterentwickelt. Mit den technischen Errungenschaften speziell der letzten 20 Jahre eröffnen sich jedoch neue Umsetzungsmöglichkeiten dieser Messverfahren. Die vorliegende Arbeit führt Untersuchungen zu einem neuartigen Ansatz durch, in welchem Geschosse durch einen Laser beleuchtet werden. Die Flugbahnaufnahme erfolgt mit Digitalkameras unter anschließender Verarbeitung am PC mittels Methoden des Maschinellen Sehens.

Nach kurzer Darlegung benötigter außenballistischer Grundlagen werden zunächst außenballistische Messverfahren ausgeführt. Hierbei wird insbesondere auf die Klasse der photogrammetrischen Verfahren eingegangen und soweit bekannte Systeme vorgestellt. Ein sich anschließender, wesentlicher Bestandteil der Arbeit befasst sich mit der radiometrischen Modellierung der lasergestützten Geschossbeleuchtung. Die durchgeführten Betrachtungen erlauben sowohl leistungsorientierte als auch energetische Abschätzungen der von einem rückwärtig beleuchteten Geschoss in einen Sensor reflektierten Strahlung. Darauf aufbauend werden im Rahmen einer Systemkonzeption Kriterien zur Detektion des fliegenden Geschosses mittels Digitalkameras hergeleitet.

Es folgen Betrachtungen zum Systemaufbau, zur Messdurchführung und zu den allgemeinen Anforderungen benötigter Systemkomponenten. Hierbei wird auch auf Anforderungen zur Messdurchführung unter Tageslichtbedingungen eingegangen. Die Ausführungen werden anhand zweier im Rahmen der Arbeit umgesetzter Systemprototypen evaluiert. Flugbahnaufnahmen wie sie mit den Prototypen in Versuchsschießen gewonnen wurden, werden präsentiert. Anschließend werden Bildverarbeitungsmethoden vorgeschlagen, ausgeführt und evaluiert, um Aufnahmen, die eine Flugbahn enthalten, automatisiert zu erkennen und darin enthaltene Flugbahnpunkte zu extrahieren. Die erreichbare Qualität der Extraktion wird hierbei in Zusammenhang mit den zuvor definierten Detektionskriterien gebracht. Zur Bewertung dienen simulierte Flugbahnbilder, welche auf Basis der aufgestellten radiometrischen Modellierung im vorangegangenen Teil der Arbeit erzeugt wurden.

Abschließend wird auf die stereometrische Auswertung der Flugbahnaufnahmen eingegangen. Nach kurzer Darlegung der hierfür benötigten Grundlagen wird die Lösung des Stereokorrespondenzproblems betrachtet. Es folgen Ausführungen zur Stereorekonstruktion von 3D-Flugbahnkoordinaten aus den extrahierten 2D-Koordinaten zweier Stereoteilbilder. Anschließend wird hergeleitet wie sich Parameter eines geeigneten Flugbahnmodells direkt aus den Stereoteilbildern über eine nicht lineare Optimierung rekonstruieren lassen. Die ausgeführten Methoden werden jeweils sowohl auf simulierte als auch reale Flugbahnaufnahmen angewendet, um die mit den Prototypen erzielbaren Genauigkeiten aufzuzeigen. Die erzielten Ergebnisse werden zusammenfassend bewertet, um abschließend einen Ausblick über das Potential zur Anwendbarkeit und Optimierung des Verfahrens zu geben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Thematische Einführung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Außenballistische Grundlagen	4
2.1	Koordinatensystem	4
2.2	Parabolisches Bahnmodell	5
2.2.1	Modellannahmen	5
2.2.2	Bewegungsdifferentialgleichung	6
2.3	Punktmassemodell	7
2.3.1	Modellannahmen	7
2.3.2	Luftwiderstandskraft	7
2.3.3	Corioliskraft	10
2.3.4	Höhen- und Ortsabhängigkeit der Schwerkraft	11
2.3.5	Klassisches Bahnmodell	12
2.3.6	Bewegungsdifferentialgleichung	12
2.4	Starrkörpermodell	13
2.4.1	Anstellung der Geschossachse	13
2.4.2	Erweiterte Modellierung des Widerstandsbeiwertes	14
2.4.3	Auftrieb	14
2.4.4	Magnuseffekt	15
2.4.5	Weitere Kräfte und Momente	16
2.4.6	Varianten	16
2.4.7	Exemplarischer Modellvergleich	18

3	Stand der Technik	20
3.1	Übersicht außenballistischer Messmethoden	20
3.1.1	Mechanische Messverfahren	21
3.1.2	Elektrische Messverfahren	22
3.1.3	Akustische Messverfahren	23
3.1.4	Radar-Messverfahren	24
3.1.5	Optische Messverfahren	26
3.2	Bekannte photogrammetrische Messverfahren	28
3.2.1	Das Normalstereogramm nach <i>Becker</i>	29
3.2.2	Das Verfahren nach <i>Neesen</i>	32
3.2.3	Ausführungen von <i>Bettermann</i> und <i>Mayer</i>	32
3.2.4	Das Verfahren nach <i>Leathem</i>	33
3.2.5	Das System <i>FightSight</i>	35
3.3	Bewertung der Verfahren	37
3.4	Zielsetzung der Arbeit	38
4	Lasergestützte Geschossbeleuchtung	40
4.1	Einführung	40
4.2	Radiometrische Definitionen	40
4.3	Modellierung der Lichtquelle	42
4.4	Statische Geschossrückstreuung	43
4.4.1	Oberfläche und Geometrie des Geschossbodens	45
4.4.2	Wellenlängenabhängigkeit	50
4.4.3	Vereinfachungen	51
4.5	Bestimmung der Rückstrefunktion	51
4.5.1	Analytische und semi-analytische Berechnung	52
4.5.2	Pathtracing-Verfahren	53
4.5.3	Versuchsmäßige Bestimmung	54
4.6	Rückstreuung des bewegten Geschosses	56
4.6.1	Bestimmung der pixelbezogenen Belichtungszeit	57
4.6.2	Abhängigkeiten der Strahlungsleistung bei der Bildgebung	59
5	Systemkonzeption	64
5.1	Systemkomponenten und -aufbau	64
5.2	Sensoranforderungen zur Geschossdetektion	67

5.2.1	Sensor-Antwortverhalten	67
5.2.2	Signalrauschen	69
5.2.3	Ableitung der Detektionskriterien	70
5.3	Berücksichtigung von Umgebungslicht	71
5.4	Anforderungen an den Laser	74
5.5	Durchführung	75
5.6	Prototypische Umsetzung	78
5.6.1	Laserbeleuchtung	79
5.6.2	Steuerungs- und Verarbeitungseinheit	79
5.6.3	Geschossverbringung	80
5.6.4	Prototyp 1 – Versuche bei Dunkelheit	81
5.6.5	Prototyp 2 – Versuche unter Tageslichtbedingungen	85
5.7	Simulation von Flugbahnbildern	90
6	Bildverarbeitung und -messung	91
6.1	Vorverarbeitung	91
6.2	Detektion der Geschosspur	93
6.3	Extraktion der Geschossflugbahnsegmente	98
6.3.1	Regionenwachstumsverfahren	100
6.3.2	Kreuzkorrelationsverfahren/Template Matching	102
6.3.3	Bewertung & Diskussion	104
6.4	Zeitliche Zuordnung der Segmente	107
7	Stereometrische Auswertung	112
7.1	Definitionen & Modellierung	112
7.1.1	Kameramodell	112
7.1.2	Zweikamerasystem	116
7.2	Bestimmung der Flugbahnkoordinaten	119
7.2.1	Lösung des Korrespondenzproblems	119
7.2.2	Stereorekonstruktion	122
7.3	Bestimmung der Flugbahnparameter	127
7.3.1	Koordinatentransformation	127
7.3.2	Optimierungsproblem	129
7.4	Evaluation/Erprobung	131
7.4.1	Wahl des Flugbahnmodells	131

7.4.2	Simulation	132
7.4.3	Versuchsschießen	134
7.4.4	Unsicherheiten des Verfahrens	136
8	Zusammenfassung	138
8.1	Stand der Arbeit	138
8.2	Ausblick	139
A	Verfahren zur qualitativen Bestimmung des Rückstreuverhaltens von Geschossböden	I-1
A.1	Messanordnung und -durchführung	I-1
A.2	Bestimmung der Mittelpunktordinate	I-5
A.3	Bestimmung des Intensitätsmaximums	I-5
A.4	Zentrierung auf das Intensitätsmaximum	I-6
A.5	Bestimmung der lokalen geschossbodenspezifischen Reflektanzverteilungsfunktion (L-GBRF)	I-7
A.6	Leistungsbasierte Wichtung	I-9
A.7	Bewertung und Anmerkungen	I-10
A.8	Transformation der L-GBRF zur GBRF	I-11
B	Kamerakalibrierung	II-1
B.1	Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter	II-2
B.2	Bestimmung der extrinsischen Kameraparameter	II-4
C	Detailauswertung exemplarischer Einzelflugbahnen	III-1
C.1	Flugbahnauswertung eines 7.62 mm-Geschosses	III-1
C.2	Flugbahnauswertung eines 9.0 mm-Geschosses	III-4
C.3	Flugbahnauswertung eines 5.56 mm-Geschosses	III-7
D	Ergänzende Abbildungen und Diagramme	IV-1
D.1	Spektrale Albedos relevanter Metalle	IV-1
D.2	Ergänzung zur zeitlichen Zuordnung von Flugbahnsegmenten	IV-3
D.3	Referenzverläufe des Luftwiderstandsbeiwerts typischer Geschosse	IV-6
	Literaturverzeichnis	V-1

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Schallgeschwindigkeit	m/s
a_f	Schallgeschwindigkeit der feuchten Luft	m/s
a_f	fokussierte Entfernung	m
\vec{A}_P	Geschossquerschnittsfläche	m ²
A_{sg}	Fläche eines Flugbahnsegmentes	px ²
a_v, a_h	vordere und hintere Grenzentfernung für eine scharfe Abbildung	m
a, a'	Objekt- bzw. Bildweite	m
$a(\lambda)$	Albedo in Abhängigkeit der Wellenlänge	1
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
c_D	Luftwiderstandsbeiwert	1
C_f	Kostenfunktion	
c_i	i -ter aerodynamischer Koeffizient	1
c_L	aerodynamischer Beiwert der Auftriebskraft	1
c_{M_F}, c_{M_M}	aerodynamische Beiwerte der Magnuskraft und des Magnusmoments	1
c_O	aerodynamischer Beiwert des Kippmoments	1
c_{P_F}, c_{P_M}	aerodynamische Beiwerte der Pendeldämpfungskraft und des Pendeldämpfungsmoments	1
c_S	aerodynamischer Beiwert des Rollbremsmoments	1
\vec{c}	Richtungsvektor der Geschossängsachse	1

\vec{c}	Vektor modellspezifischer Flugbahnparameter	1
d	Abstand	m
d	Geschosskaliber	m
$D(u, v)$	Differenzbild	
E	Bestrahlungsstärke	W/m ²
E	Essentialmatrix	1
E	Sättigungsdampfdruck	Pa
e	Elementarladung	C
e	Residuum	
e_l, e_r	Epipole des linken und rechten Stereoteilbildes	
\vec{F}	Kraftvektor	N
F	Fundamentalmatrix	1
f	Brennweite	m
\vec{F}_D	Luftwiderstandskraft	N
f_D	Frequenzverschiebung	Hz
f_d	Anzahl Freiheitsgrade	1
f_I	lokale Geschossbodenrückstreuungsfunktion (L-GBRF)	m ² /sr
\vec{F}_L	Auftriebskraft	N
f_L	Brennweite (der Linse)	m
f_L	Modulationsfrequenz des Lasers	Hz
\vec{F}_M	Magnuskraft	N
f_m	Flugbahnmodell	m
\vec{F}_P	Pendeldämpfungskraft	N
f_I	Geschossbodenrückstreuungsfunktion (GBRF)	m ² /sr
f_r	Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF)	1/sr
G	Antennengewinn eines Radars	1
g, \vec{g}	betragsmäßige und vektorielle Schwerebeschleunigung	m/s ²
H	Bestrahlung	J/m ²
h	Höhe über dem Erdellipsoiden	m
H_0	Nullhypothese	

H, H'	objekt- und bildseitige Hauptebene	
\vec{H}	Drehimpulsvektor	$\text{kg m}^2 \text{ rad/s}$
I	Einheitsmatrix	1
i	Laufvariable	1
I, I_L	Strahlstärke, — des Lasers	W/sr
I_q, I_l	Quer- und Längsträgheitsmoment des Geschosses	kg m^2
$I(u, v)$	Eingangsbild	
K	Ausleseverstärkung	DN/e^-
K	Kameramatrix	1
k	Blendenzahl	1
L	Anpassungsfunktion zur Verzeichnungskorrektur	1
L	Strahldichte	W/sr/m^2
l_l, l_r	Epipolarlinien des linken und rechten Stereoteilbildes	
M	Mittelpunkt des Geschossbodens	
m	(Geschoss-)Masse	kg
m_0	Abstand der Flugbahn im Durchstoßpunkt der Bildebene zur optischen Achse	m
\vec{M}_M	Magnusmoment	N m
\vec{M}_O	Kippmoment	N m
\vec{M}_P	Pendeldämpfungsmoment	N m
\vec{M}_S	Rollbremsmoment	N m
Ma	Machzahl	1
m'	Entfernung zur optischen Achse	m
$\vec{M}, \underline{\vec{M}}$	Objektpunkt im Koordinatensystem des Kamerasystems in inhomogener und homogener Form	m
\vec{m}	Bildkoordinate	1
n_f	Anzahl ausgewerteter Geschossflugbahnen	1
$n_{e,g}, n_{e,p}, n_{e,d}$	Elektronenzahl: gesamt, bedingt durch Photonen, bedingt durch Dunkelstrom	1
n_I	Anzahl der Bilder, welche eine Geschossflugbahn enthalten	1
n_o	Ordnungsnummer eines Flugbahnsegmentes	1
n_p	Photonenzahl	1

$n_{e,s}$	Elektronenzahl zur Erreichung des maximalen Grauwertes	1
N_{sg}	Anzahl Flugbahnsegmente	1
N_{ksg}	Anzahl korrespondierender Flugbahnsegmentpaare	1
$n_{e,U}$	Elektronenzahl induziert durch Umgebungslicht	1
n_v	Versatz der Ordnungsnummern zwischen den Flugbahnsegmenten zweier Stereoteilbilder	1
O	Optisches Zentrum	
o	Anzahl zur Störungsminderung verwendeter Differenzbilder	1
p	Luftdruck	Pa
\underline{P}	Projektionsmatrix im Koordinatensystem des Kamerasystems in inhomogener und homogener Form	m
P_Q	Punktlichtquelle	
P_S, P_E	Sende- und Empfangsleistung	W
p_w	Pixelbreite	m
Φ	Strahlungsfluss	W
ϕ	Drehwinkel	rad
Q, Q_{px}	Strahlungsenergie, — für ein Pixel	J
q_t	Pendelrate	Hz
R	Drehmatrix vom Koordinatensystem des Kamerasystems in das außenballistische Koordinatensystem	
r	Radius	m
R_E	gemittelter Erdradius	m
r_e, r'_e	objekt- und bildseitiger Radius des Geschossbodens	m
R_L	stoffspezifische Gaskonstante	J/kg/K
r_L	relative Luftfeuchte	1
$R(\lambda)$	Sensitivität in Abhängigkeit der Wellenlänge	A/W
R_R	Radarentfernung	m
r_Z	Radius des Zerstreungskreises	m
\vec{r}	Ortsvektor des Geschosses im außenballistischen Koordinatensystem	m
s	Flugbahnlänge bezogen auf die Bildebene	m

s	Skalierungsfaktor	1
s	empirische Standardabweichung	
s_f	Scherungsfaktor	1
$\sigma_g^2, \sigma_{y,d}^2, \sigma_q^2$	Varianz der Grauwerte: gesamt, bedingt durch Dunkelrauschen, bedingt durch Quantisierungsrauschen	
$\sigma_{e,p}^2, \sigma_{e,d}^2$	Varianz photoneninduzierter Elektronen, — des Dunkelstroms	
s_k	Reziproke der Kantenlänge eines Pixels	1/m
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
$t_{fd,1-\alpha/2}$	Quantil der <i>Student</i> -Verteilung	1
t_d	Flugdauer	s
t_{px}	Belichtungszeit eines Pixels	s
T_v	virtuelle Temperatur	K
TS	Teststatistik	
\vec{t}	Translationsvektor	m
$u_{1-\alpha/2}$	Quantil der Standardnormalverteilung	1
u, v	Spalten- und Zeilenvektor einer Rastergrafik	px
\vec{u}	vektorielle Geschwindigkeit bzgl. des Erdbodens	m/s
v, \vec{v}	betragsmäßige und vektorielle Geschwindigkeit bzgl. der Luft	m/s
\vec{w}	vektorielle Windgeschwindigkeit bzgl. des Erdbodens	m/s
w	Entfernung zur optischen Achse	px
y_g, y_p, y_d	Grauwert: gesamt, bedingt durch Photonen, bedingt durch Dunkelstrom	DN

Griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
α	Azimutwinkel/Geschossabgangswinkel	rad
α	Irrtumswahrscheinlichkeit	1

α_{KS}	globales Azimut des Kamerasystems	rad
α_L	Lokaler Azimutwinkel	rad
α_M	Mach'scher Winkel	rad
α_s	Winkel zwischen Geschossflugbahn und Bildebene	rad
α_x, α_y	horizontale und vertikale Skalierungsfaktoren der Kameramatrix	1
β'	Abbildungsmaßstab	1
β_N, β_R	Nick- und Rollwinkel des Koordinatensystems des Kamerasystems	rad
Δ	Differenz	
$\delta, \vec{\delta}$	betragsmäßiger und vektorieller Geschossanstellwinkel	rad
δ_L	halber Öffnungswinkel des Laserstrahls	rad
η_s	Quanteneffizienz (des Sensors)	1
h	Planck'sches Wirkungsquantum	J s
$\kappa_1, \dots, \kappa_n$	Verzeichnungskoeffizienten	1
κ_L	Adiabatenkoeffizient der trockenen Luft	1
Λ	Coriolisbeschleunigung	m/s ²
λ	Wellenlänge	1/m
λ_b	Breitengrad	rad
Ω	Raumwinkel	sr
Ω	Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation	rad/s
ρ	Luftdichte	kg/m ³
σ	effektive Reflexionsfläche	m ²
θ	Winkel bzgl. der Flächennormalen	rad
θ_B	Winkel zwischen Radarstrahl und Geschossflugbahn	rad
θ_L, θ_P	lokaler Einfalls- und Reflexionswinkel	rad
θ_M	idealer Reflexionswinkel eines unter θ_N einfallenden Strahls	rad
θ_N	Winkel zwischen der Geschoss längsachse und dem Strahl von der Lichtquelle zum Mittelpunkt des Geschossbodens	rad
θ_R	Winkel zwischen der Geschoss längsachse und dem Strahl vom Mittelpunkt des Geschossbodens in das optische Zentrum der Kamera	rad

θ_S	Winkel zwischen der optischen Achse und dem Strahl vom optischen Zentrum des Sensors zum Mittelpunkt des Geschossbodens	rad
φ	Drehwinkel des Geschosses um seine Längsachse	rad
ϑ	Bahntangentenwinkel	rad
ϑ_0	Elevationswinkel/Geschossabgangswinkel	rad

Indizes

Kürzel	Beschreibung
0	Anfang, initial
c	Zentrum
d	verzeichnungsbehaftet
E, A	Einfallrichtung, Ausfallrichtung
k	Koordinatensystem des Kamerasystems
l, r	links, rechts
max	maximal
min	minimal
u, v	bezogen auf den Spalten- bzw. Zeilenvektor des Bildes
ξ	Platzhalter für l, r

Abkürzungen

Kürzel	Beschreibung
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BV	Bildverarbeitung
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
DFS	Direct Fire Solution

DN	Digital Number
DoF	Degrees of Freedom
DR	Dynamic Range
FPGA	Field Programmable Gate Array
fps	frames per second
FWHM	Full Width at Half Maximum
GBRF	Geschossbodenrückstreuungsfunktion
GPU	Graphics Processing Unit
HT	Hough-Transformation
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICCD	Intensified CCD
IR	Infrarot
KK	Kreuzkorrelation
L-GBRF	lokale GBRF
LS	Least-Squares
MetCM	Meteorological Computer Message
MetGM	Meteorological Grid Message
MPMM	Modifiziertes Punktmassenmodell
MWIR	Mid-wavelength IR
NABK	NATO Armaments Ballistic Kernel
NIR	nahes IR
PMM	Punktmassenmodell
ROI	Region of Interest
RW	Regionenwachstum
S4	(NATO) Sub Group 2 Shareable (Fire Control) Software Suite
SNR	Signal to Noise Ratio
TTL	Transistor-Transistor-Logic
VIS	visueller Wellenlängenbereich
WGS84	World Geodetic System 1984
WTD 91	Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition, Meppen