

Summary

In this thesis, standoff detection from air and spaceborne platforms was attempted, under test and real conditions. The results obtained show that standoff detection can assist in the (difficult and dangerous) field-based humanitarian demining efforts.

Landmines, once laid, have a potential to maim and kill long after the conflict is over, until the mine is cleared. The warring parties do not keep reliable records or maps where they have placed the mines or laid the minefields. Since the 2nd World War millions of mines have been laid worldwide in wars, civil conflicts and in campaigns of blind terrorism against civilians. In spite of great willingness for assistance in the affected countries, serious accidents continue to occur. Landmines and minefields not only affect people, they also have a tremendous impact on national economies. In the war affected areas billions of dollars, which could be used for rehabilitation, have to be used to clean the debris of war. The integrated civilian approach in response to the landmine problem is called mine action and covers a far wider scope of activities than mine clearance only and differs in a number of aspects from military related demining activities.

Present day operational methods for detection of landmines still rely on ground / field based methods mainly using metal detectors and dogs. For detailed localization probing techniques are applied. To detect and remove landmines and unexploded ordnance contamination will take a long time using the current methods. To speed up this process the present clearance rates should be improved using better sensing and detection technology. There is a growing recognition that remote sensing could become a particular useful tool to provide valuable information for the mine action process and to assist in the process of conventional minefield detection. The military have developed airborne sensors and processing techniques to detect minefields. Some of these are now available to the scientific community to develop peacetime, humanitarian approaches to landmine detection. Air and spaceborne systems, equipped with different sensors, can quickly and safely scan large (inaccessible) areas and the information obtained can contribute to the mapping and identification of suspect areas, identification and determination of the minefield boundaries and under favorable conditions even the identification and localization of individual mines. In general, within the suspect regions identified, only small areas are actually mine affected and therefore a reliable area reduction technique is an extremely efficient and cost-effective tool to release suspect land. At present there are not many area reduction techniques apart from physical area reduction by means of a so-called "level-2" field survey.

Air and spaceborne remote sensing techniques, which have previously been applied to other problems, can now be adapted and customized to the problem of identification of suspect areas and minefield detection. The main objective of this research was to evaluate the use of space and airborne remote sensing as a wide area standoff detection technique for humanitarian demining purposes, especially the potential to assist in conventional level 1 and level 2 surveys.

Chapter 2 presents background information, obtained from literature, on the relevant (declassified) aspects related to strategic overhead detection techniques developed by the

Summary

military / intelligence community as well as those of civilian space and airborne remote sensing programs. The airborne sensing techniques describe the state of the art of sensors, such as optical (film, multi- and hyperspectral sensors), thermal infrared as well as microwave sensors. Image analyses techniques are described related to visual image interpretation, digital image processing, change detection analysis and image fusion. A multitude of images can be obtained from medium to high resolution satellites, orbiting the earth from the 1960's onward and application of these image processing techniques allows for the incorporation of this information into the overall analysis process. If still higher resolution (up to date) images are required, multi-sensor airborne surveys can be conducted.

Research using images recorded by standoff sensors has very much concentrated on the detection of individual landmines. For a reliable detection and classification of individual landmines and mine-like targets high spatial resolutions are required to have a number of pixels over target in order to obtain significant differences between the target pixels and the surrounding (environmental) clutter. Research has shown that each of these sensors have specific limitations with regard to this clutter, therefore allowing detection only under certain conditions. Many of these target detection and classification studies have been conducted using images acquired under controlled conditions. These test-beds are not found in reality and given real world complexities, in combination with larger time frames when landmines were deployed, it is reasonable to assume that the detection performance will even be further degraded. Therefore concentrating on minefields, rather than individual mines, seems a more promising approach for standoff detection.

In general, the (standoff) system performance is described by parameters such as the probability of detection and false alarm rate and evaluates the image and the detection - classification routines. Much attention is given to (real-time) automatic detection of mines and mine-like features, especially by the military. By incorporating experienced image analysts / photo interpreters ("man in the loop") into the processing chain (as real-time is not a major constraint for humanitarian demining), a significant improvement to present methods could be obtained. The main challenge therefore is more in the area of target feature extraction and processing rather than in acquiring a useable signature, as at present multiple sensors are able to obtain high spatial resolutions over a wide range of the electromagnetic spectrum using a (large) number of discrete spectral channels. Therefore incorporating minefield and mine related features into the detection and classification process will enhance the system performance.

Chapter 3 outlines the features often found in association with the presence of minefields that can be detected by remote sensing techniques. After presenting a framework to obtain minefield related indicators, examples from Western Europe of relevant features, related to the occurrence and the layout of minefields, are given. An extensive survey revealed that this approach is also valid for other areas and other types of conflicts. Study of relevant documents, site visits and discussion with a number of demining organizations showed that, although haphazard mining has occurred, often mines have been placed with a certain objective. By understanding these objectives and then linking them to remotely sensed image features, minefields can be localized and mapped. Direct and indirect indicators of minefields are presented for Angola, Zimbabwe, Mozambique and Croatia.

In chapter 4 the overall methodology is presented and for the three phases differentiated within this research, specific research questions are defined. For evaluation of these questions, pilot studies have been designed using a multitude of remote sensing images of different areas, in conjunction with different types of analysis methods, to enable the determination of their suitability towards identification of suspect areas and minefields. A short description is provided for each of the activities conducted within the framework of this research.

Chapter 5 describes the details of the test using a multi-sensor airborne platform, conducted in Belgium and provides the results obtained. First the pilot area is described. The layout of the test area near Leopoldsborg in Belgium is presented, type of mines used, their characteristics and locations of the inert mines as well as other relevant test area features. Subsequently, acquisition and the initial processing of the data are discussed. For the analogue data collected, image analysis was conducted using visual (stereoscopic) image interpretation. The digital sensor data obtained was imported into image processing software for further enhancement and analysis. Subsets were selected, based on preliminary visual interpretation results using large scale stereo aerial photography and their signatures were studied.

The initial blind interpretation results using the images acquired of the test were, in a later stage, compared to the ground truth tables showing all the landmine locations and seven out of the nine minefields constructed were partly or completely detected. Two minefields, consisting completely of anti-personnel mines were not detected. Direct landmine identification, in combination with other indicators, allowed for the airborne detection of these minefields using large scale images, acquired up to one year after actual landmine deployment. The minefields identified were classified as definite, probable and possible using image signatures and related indicators obtained from the high resolution optical data, thermal infrared and radar images. After the ground truth, further image analysis was conducted to determine the reasons why certain minefields were detected and others remained unnoticed on the airborne data collected. The known mine locations were plotted on the geo-coded thermal and radar images to see if the minefields could be detected once the exact positions of the landmines were known. The contribution of the different images was studied in detail to determine their suitability for detection of minefields. Based on these results the optimum airborne sensor configuration was defined.

In chapter 6 the results are presented of the airborne and satellite based detection of minefields in Mozambique and Zimbabwe. First an overview is presented of the pilot areas selected, representing different climatological and environmental zones, followed by a description of a number of minefield deployment methods found in Mozambique and the high resolution airborne data collected over these areas during the airborne campaign. The results of the image analysis are presented and discussed subsequently. The minefields, mainly consisting of AP mines, were constructed over twenty years ago. For detection of these minefields only indicators could be applied, justifying for at least two of the four areas the minefield perimeter. For the other two test areas only the suspect regions could be identified and the likely location of the minefield, based on mine laying practices adopted during the conflict at such places. The second part of this chapter focusses on the use of

Summary

satellite remote sensing for minefield detection. A test area was selected based on the airborne data collected in Mozambique (surrounding Songo) and multi-temporal satellite images acquired using multiple sensors were analyzed to evaluate their suitability for detection of minefield indicators. Using satellite data archives images could be acquired dating from 1973 to the present, allowing for an extensive analysis of temporal developments and the contribution of each of the satellite sensors used towards the detection of minefields. To evaluate if the results obtained are representative, other test areas, marking the border zone between Mozambique and Zimbabwe, were analyzed using different types of satellite images, combined with medium resolution multi-temporal aerial photography. The smaller scale air and spaceborne images were analyzed and the indicators obtained could be used for the identification and delineation of the suspect areas and minefield perimeter in the test areas selected in Mozambique and Zimbabwe. Also use was made of outdated topographical maps providing ancillary information used during image interpretation.

The final chapter discusses the results obtained from this research. In this thesis the use of space and airborne remote sensing as a wide area detection technique to contribute to the humanitarian demining process was evaluated for a number of pilot areas. The identification of suitable direct and indirect image indicators, in combination with collected ancillary information, prior knowledge/intelligence, etc., provided major keys towards the successful identification and detection of suspect areas and minefields using standoff detection techniques.

Finally the thesis presents some other findings relevant for humanitarian demining purposes and mine action in general as well as providing a number of recommendations for further research.

Zusammenfassung

Die Arbeit setzt sich mit Verfahren der Fernerkundung zur Identifizierung von Landminenfeldern in methodenkritischer und anwendungsorientierter Weise auseinander. Damit wird das Ziel verfolgt, die schwierige, langwierige und häufig gefährliche zivile Minenräumung wirksam zu unterstützen.

Einmal gelegt, haben Landminen noch lange nach Konfliktbeendigung das Potential zum Verstümmeln und Töten. Die Kriegsparteien führen in der Regel keine zuverlässigen Aufzeichnungen oder Karten darüber, wo sie die Minen plaziert haben oder wo sich Minenfelder befinden. Die quantitativen Dimensionen sind erschreckend hoch: seit dem Ende des Zweiten Weltkrieges wurden weltweit Millionen von Minen in Kriegen, Bürgerkriegen und militanten Konflikten gelegt. Ungeachtet der grossen Bereitschaft der betroffenen Länder, Räumungen nach Beilegung der Auseinandersetzungen herbeizuführen, treten weiterhin ernsthafte Unfälle auf, bei denen Zivilisten die hauptsächlichen Opfer sind. Landminen und Minenfelder betreffen aber nicht nur die Menschen, sie haben auch einen enormen Einfluss auf die nationale Wirtschaft. So müssen in den vom Krieg betroffenen Gebieten enorm hohe Geldsummen für die Räumung der Kriegsschäden aufgebracht werden und stehen somit nicht für den Wiederaufbau zur Verfügung. Der integrierte zivile Ansatz als Reaktion auf das Landminenproblem (*“Mine action”*) deckt ein wesentlich breiteres Handlungsfeld als nur die Minenräumung ab und unterscheidet sich dadurch von militärischen Minenräumungen.

Gegenwärtig verlassen sich operationalisierte Methoden der Identifizierung von Landminen noch auf bodengestützte Methoden, hauptsächlich unter Einsatz von Metalldetektoren und Hunden. Für eine detaillierte Lokalisierung werden Suchtechniken (*“Probing techniques”*) angewandt. Jedoch ist davon auszugehen, daß bei Verwendung dieser Methoden das Entdecken und Entfernen von Landminen und unexplodierter Munition eine lange Zeit in Anspruch nehmen wird. Zur Beschleunigung dieses Prozesses sollte die aktuelle Räumungsrate durch den Einsatz besserer Technologien der Erkennung erreicht werden. Insbesondere die Fernerkundung kann ein sinnvolles Werkzeug zur Bereitstellung wertvoller Informationen bezüglich des *“Mine action process”* und zur Unterstützung der konventionellen Minenfeldentdeckung werden. Beispielsweise hat das Militär verschiedener Länder Flugzeugsensoren und Bearbeitungstechniken zur Erkennung von Minenfeldern entwickelt. Einige von ihnen sind bereits für die *“Scientific community”* verfügbar, um humanitäre Ansätze zur Landminenentdeckung zu entwickeln. Weiterhin tasten Luft- und Weltraumsysteme, ausgestattet mit verschiedenen Sensoren, schnell und sicher grosse und unzugängliche Gebiete ab. Die gewonnenen Informationen können zur Kartierung und Identifikation der verdächtigen Gebiete, der Identifikation und Bestimmung der Minenfeldergrenzen sowie unter besonders guten Bedingungen sogar zur Identifikation und Lokalisierung einzelner Minen beitragen. Gewöhnlich sind innerhalb der identifizierten Region nur kleine Gebiete von Minen betroffen. Somit ist eine zuverlässige Gebietseingrenzung eine sehr effiziente und kosteneffektive Methode zur Bestimmung von Verdachtsflächen bzw. Ausweisung von minenfreien Gebieten. Derzeit existieren nur wenige Techniken der Gebietseingrenzung, abgesehen von Verfahren am Boden (sogenannte *“Level-2”* Gebietserhebung).

Zusammenfassung

Luft- und weltraumgestützte Fernerkundungstechniken, welche zunächst für andere Problemfelder angewandt wurden, können auf die Aufgabenstellung der Identifikation verdächtiger Gebiete und der Entdeckung von Minenfeldern übertragen und individuell angepasst werden. Der Hauptgegenstand dieser Arbeit ist die Bewertung des Einsatzes weltraum- und flugzeuggestützter Fernerkundung als ein Anwendungsgebiet der “*Standoff detection*”-Technik für humanitäre Vorhaben der Minenräumung v.a. dem Potential zur Unterstützung konventioneller “*Level-1*” und “*Level-2*” Erhebungen.

Kapitel 2 präsentiert den Forschungsstand und die aus der Literatur gewonnenen Hintergrundinformationen über relevante (unklassifizierte) Aspekte strategisch übergeordneter Entdeckungstechniken die durch Militär- bzw. Spionage-Organisationen entwickelt wurden. Weiterhin wird ein Überblick über die zivilen weltraum- und flugzeuggestützten Fernerkundungsprogramme gegeben. Die flugzeuggestützten Sensoren, die dem neuesten Stand der Technik entsprechen, wie zum Beispiel optische Sensoren (Film, multi- und hyperspektrale Sensoren), thermales Infrarot sowie Mikrowellensensoren werden in Hinblick auf ihre Eignung diskutiert. Weiterhin werden Bildanalysetechniken bezüglich visueller Interpretation, digitaler Bildverarbeitung, Änderungsdetections-Analyse und Bildfusion beschrieben. Eine Vielzahl an Bildern kann von Satelliten mit mittlerer bis hoher Auflösung, welche die Erde seit den 60er Jahren umkreisen, gewonnen werden. Anwendungen dieser Bildverarbeitungstechniken ermöglichen die Eingliederung der Informationen in den übergeordneten Analyseprozess. Noch höher auflösende (aktuelle) Bilder stellen multisensorale Flugzeugerkundungen bereit.

Die Forschungsansätze, die durch “*standoff*” Sensoren aufgezeichnete Bilder nutzt, sind zur Zeit stark auf das Entdecken einzelner Landminen konzentriert. Für eine zuverlässige Entdeckung und Klassifikation einzelner Landminen und minenähnlicher Ziele wird eine hohe räumliche Auflösung benötigt. Voraussetzung sind eine genügende Zahl an Pixeln des Zieles (der Landminen), um signifikante Unterschiede zwischen Zielpixeln und Pixeln der Umgebung aufzuzeigen. Die Forschung hat ergeben, dass die herangezogenen Sensoren spezifische Beschränkungen aufweisen und somit eine Entdeckung nur unter bestimmten Bedingungen möglich ist. Viele der bisherigen Studien zur Minenentdeckung wurden von zuvor erstellten künstlichen Testminenfeldern durchgeführt. In der existierenden Komplexität realer Auseinandersetzungen liegen solche Testgebiete allerdings nicht vor. In der praktischen Arbeit bestehen daher viele erschwerende Einflußgrößen und es muss mit Veränderungen über grössere Zeiträume (Jahre bis Jahrzehnte) gerechnet werden. Dadurch scheint die Konzentration auf Minenfelder und nicht auf einzelne Minen, der weiterführende Ansatz der “*Standoff detection*” zu sein.

Gewöhnlich wird die Ausführung des (“*standoff*”) Systems von Parametern beschrieben, wie der Entdeckungswahrscheinlichkeit und von Falschalarmraten und das Bild wird im Zusammenhang mit der Entdeckung – Klassifikationsroutine bewertet. Der automatischen (Echtzeit) Entdeckung von Minen und minenähnlichen Merkmalen vor allem beim Militär wird v.a. mehr Beachtung gegeben. Durch die Aufnahme erfahrener Bildanalysten (“*man in the loop*”) in die Prozesskette (da Echtzeit nicht zwingend für humanitäre Entminung ist), könnte eine wesentliche Verbesserung der Ergebnisse erreicht werden. Die grösste Herausforderung liegt somit eher in der Zielmerkmalsextraktion und –bearbeitung als im

Erwerb nutzbarer Signaturen, soweit multiple Sensoren derzeit in der Lage sind, räumlich hoch auflösende Daten für ein breites elektromagnetisches Spektrum unter Nutzung einer (grossen) Zahl diskreter spektraler Kanäle aufzunehmen. Somit wird die Berücksichtigung von Minenfeldern und minen-typischen Merkmalen in den Entdeckungs- und Klassifikationsprozess die Leistungsfähigkeit des Erkennungssystems steigern.

Kapitel 3 beschreibt die Merkmale, welche beim Vorhandensein von Minenfeldern oft mittels Fernerkundungstechniken aufgedeckt werden können. Nach der Darstellung eines Arbeitsrahmens für den Erwerb von Indikatoren, die sich auf Minenfelder beziehen lassen, werden Beispiele für relevante Merkmale aus Westeuropa im Zusammenhang mit dem Auftreten und der Anordnung von Minenfeldern geliefert. Eine umfassende Prüfung zeigt, dass dieser Ansatz auch für andere Gebiete sowie andere Konfliktarten gültig ist. Das Studium relevanter Dokumente, Geländearbeit vor Ort und Diskussionen mit einer Vielzahl von Entminungsorganisationen zeigt, dass trotz vermeintlich willkürlicher Verlegung von Minen bestimmte Vorsätze erkennbar werden. Durch das Verständnis dieser Absichten und ihre Verbindung mit fernerkundlichen Bildmerkmalen können Minenfelder lokalisiert und kartiert werden. In der Arbeit werden direkte und indirekte Indikatoren für Minenfelder für Angola, Simbabwe, Mozambique und Kroatien präsentiert.

In Kapitel 4 wird die übergeordnete Methodologie präsentiert und für die drei Phasen innerhalb dieser Arbeit differenziert. Spezifische Forschungsfragen werden definiert. Zur Bewertung dieser Fragen wurden Pilotstudien, welche eine Vielzahl an Fernerkundungsbildern aus verschiedenen Gebieten in Verbindung mit verschiedenen Arten von Analysemethoden nutzen, entwickelt, um bestimmen zu können, inwiefern sie zur Identifikation verdächtiger Gebiete und Minenfelder geeignet sind. Eine kurze Beschreibung jeder dieser Aktivitäten wird geliefert.

Kapitel 5 beschreibt die Details des Testes zur Nutzung flugzeuggestützter multi-sensoraler Plattformen, der in Belgien durchgeführt wurde, und stellt die gewonnenen Ergebnisse dar. Die Gestaltung des Testgebietes in der Nähe von Leopoldsborg in Belgien wird beschrieben. Weiterhin werden die Arten der genutzten Minen, deren Charakteristik sowie die Lage der inaktiven Minen und andere für das Testgebiet relevanter Merkmale aufgezeigt. Anschliessend werden die Datennahme und vorbereitende Datenbearbeitung diskutiert. Für die analog gesammelten Daten wurde die Bildanalyse durch den Einsatz visueller (stereoskopischer) Bildinterpretation durchgeführt. Die erhobenen digitalen Sensordaten wurden in eine Bildinterpretationssoftware für weitere Verbesserungen und Analysen eingespeist. Teilausschnitte wurden, basierend auf vorbereitenden visuellen Interpretationsergebnissen, unter Verwendung grossmassstäbiger Stereoluftbilder ausgewählt und ihre Signaturen wurden untersucht.

Die ersten blinden Interpretationsergebnisse, die die aus dem Test erworbenen Bilder nutzen, wurden in einem späteren Schritt mit den "*Ground truth tables*", welche alle Positionen der Landminen zeigen, verglichen. Sieben der neun errichteten Minenfelder wurden teilweise oder vollständig entdeckt, zwei Minenfelder, die vollständig aus Antipersonenminen bestehen, wurden nicht entdeckt. Die "*Standoff detection*" erlaubt – in Kombination mit anderen Indikatoren – die direkte Identifikation einzelner Landminen. Für

Zusammenfassung

eine Anzahl dieser Minenfelder sind grossmasstäbige Bilder bis zu einem Jahr nach der eigentlichen Legung der Landminen herangezogen und untersucht worden. Die identifizierten Minenfelder wurden in "eindeutig", "wahrscheinlich" und "möglich" unter Verwendung von Bildsignaturen und von Indikatoren klassifiziert, die von hochauflösenden optischen Daten, thermalen Infrarotbildern und Radarbildern gewonnen wurden. Nach der "*Ground truth*" wurde eine weiterführende Bildanalyse zur Ermittlung der Gründe durchgeführt, warum bestimmte Minenfelder von den flugzeuggestützten Daten entdeckt werden konnten und andere unentdeckt geblieben sind. Die bekannten Minenplätze wurden auf die geocodierten thermalen und Radarbilder aufgezeichnet, um im Nachhinein feststellen zu können, ob die Minenfelder sowie die genaue Lage der bekannten Landminen herausgearbeitet werden können. Der Beitrag der verschiedenen Bilder wurde im Detail untersucht, um ihre generelle Eignung für die Entdeckung von Minenfeldern zu bestimmen. Auf diesen Ergebnissen basierend wurde die optimale Konfiguration der Flugzeugsensoren für den Einsatz über reale Minenfelder in Afrika festgelegt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse einer Kampagne zur flugzeug- und satellitenbasierten Minenfeldentdeckung in Mozambique und Simbabwe präsentiert. Zunächst wird ein Überblick der ausgewählten Pilotgebieten mit ihren verschiedenen Klima- und Umweltzonen gegeben. Es folgt die Beschreibung einer Anzahl von in Mozambique vorgefundenen Anwendungsmethoden der Minenfeldverteilung (grösstenteils aus Antipersonenminen bestehend, die vor mehr als 20 Jahren errichtet worden sind) sowie der hochauflösenden Flugzeugdaten, welche während einer Befliegungskampagne für diese Gebiete gesammelt wurden. Anschliessend werden die Ergebnisse der Bildanalyse präsentiert und diskutiert. Zur Entdeckung dieser Minenfelder konnten nur Indikatoren angewandt werden, die mindestens für zwei der vier Gebiete die Minenfeldparameter rechtfertigen. Für die beiden anderen Testgebiete konnten nur die verdächtigen Gebiete identifiziert werden sowie die wahrscheinliche Lage des Minenfeldes. Für dieses Vorgehen ist eine Minenlegepraxis angenommen worden, die für Konflikte in dieser Region typisch sind.

Der zweite Teil dieses Kapitels ist auf den Einsatz der Satellitenfernerkundung für Minenfeldentdeckung fokussiert. Basierend auf in Mozambique (in der Umgebung von Songo) gesammelten Flugzeugdaten wurde ein Testgebiet ausgewählt. Anschliessend wurden multitemporale Satellitenbilder, die unter Einsatz verschiedener Sensoren entstanden sind, zur Bewertung der Eignung für das Entdecken von Minenfeldindikatoren analysiert. Durch die Verwendung von Satellitendaten-Archiven ließen sich Bilder von 1973 bis zur Gegenwart untersuchen. Anhand dieser Bilder konnten zeitliche Entwicklungen sowie der Beitrag der jeweiligen Satellitensensoren festgestellt werden, die zur Entdeckung von Minenfeldern führen. Um bewerten zu können, ob die gewonnenen Ergebnisse repräsentativ sind, wurden andere Testgebiete, die die Grenzzone zwischen Mozambique und Simbabwe markieren, analysiert. Hier kamen verschiedene Satellitenbildarten in Kombination mit mittelauflösenden multitemporalen Luftbildern zum Einsatz. Ebenfalls genutzt wurden alte topographische Karten, die Zusatzinformationen für die Bildanalyse liefern.

Das abschließende Kapitel diskutiert die Ergebnisse, die in dieser Untersuchung gewonnen wurden. In dieser Dissertation wurde der Einsatz von Weltraum- und Flugzeugfernerkundung als ein Beitrag des humanitären Räumungsprozesses von Landminen für eine Anzahl an Pilotgebieten bewertet. Die Identifikation geeigneter direkter und indirekter Bildindikatoren, in Kombination mit gesammelten Zusatzinformationen, früherem Wissen etc., stellt Lösungsansätze für eine erfolgreiche Identifikation und Abgrenzung verdächtiger Gebiete und Minenfelder unter Einsatz der *“Standoff detection”* dar. Weiterhin gibt die Dissertation Handlungsvorschläge, die für humanitäre Vorhaben der Minenräumung und generelle Minenaktionen relevant sind und eine Anzahl an Empfehlungen für weitergehende Forschung.