

Schlussbericht (Einzelbericht Hochschule Mannheim)

zum Verbundprojekt: **ITD (Intelligent Tool Drive) – ein handgehaltenes robotisches System für chirurgische Anwendungen**

Zuwendungsempfänger	Förderkennzeichen	Teilvorhaben
MRC Systems GmbH	13EZ1205A	Prozesssteuerung, Operationsplanung und Systemintegration
Binder Elektronik GmbH	13EZ1205B	Hardwareentwurf und Labormusteraufbau von mikroelektronischen Baugruppen für eine Operationsroboter-Steuerung
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (OUZ und LSA)	13EZ1205C	Entwicklung, Konstruktion und Adaption der einzelnen Systemkomponenten des ITD
Hochschule Mannheim	13EZ1205D	Hybrides Tracking

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 – 30.06.2015

I. Kurze Darstellung

1) Aufgabenstellung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „ITD (Intelligent Tool Drive) – ein handgehaltenes robotisches System für chirurgische Anwendungen“ sollte ein handgehaltener Operationsroboter entwickelt werden, d.h. eine intelligente Maschine zur Knochenbearbeitung, die vom Arzt in der Hand gehalten wird. Die Positionierung des Bearbeitungswerkzeugs relativ zum Knochen sollte dabei durch optisches Tracking und weitere Sensorik bestimmt und das Werkzeug automatisch gegenüber äußeren Störungen korrigiert werden. Auf diese Weise sollte es möglich werden, Störungen durch z.B. Zittern des Anwenders oder Bewegung des Knochens auszugleichen.

Forschungs- und Entwicklungsarbeit war auf verschiedenen Gebieten zu leisten:

- Konstruktive und elektromechanische Realisierung der Maschine mit kompakter Größe und niedrigem Gewicht
- Aufbau eines optischen Trackingsystems mit hoher Trackinggeschwindigkeit
- Entwicklung von kompakten elektronischen Baugruppen
- Integration einer Echtzeitregelung zur Stabilisierung des Bearbeitungswerkzeugs
- Ausarbeitung eines Planungssystems zur Festlegung der Bearbeitungsgeometrie
- Ergonomische Auslegung ohne Sichtbehinderung während des Bearbeitungsprozesses
- Berücksichtigung der medizinischen Anforderungen
- Einsatz in in-vitro-Experimenten

Dieser „Intelligent Tool Drive (ITD)“ genannte Operationsroboter wäre in der Lage, die Therapie der Patienten auf verschiedenen Ebenen deutlich zu verbessern. Ein zentrales Einsatzgebiet wäre die Implantologie, die aufgrund der hohen Zahlen betroffener Patienten einen sehr wesentlichen Faktor im deutschen Gesundheitssystem darstellt.

2) Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Vor dem Start des Verbundprojekts war von einigen am FuE-Vorhaben beteiligten Verbundpartnern ein Labormuster erstellt worden, das sowohl in Bezug auf Baugröße, Gewicht und Ergonomie, als auch in Bezug auf Präzision und Regelungsstabilität noch nicht an handgehaltene Experimente denken ließ.

Am Projekt waren klinische, wissenschaftlich-technische und industrielle Partner beteiligt. Die Koordination lag bei einem KMU. Von Beginn an wurde ein großer deutscher Implantat-Hersteller als assoziierter Partner beratend eingebunden.

3) Planung und Ablauf des Vorhabens

Die industriellen und wissenschaftlichen Partner des Verbunds wurden mit ihren unterschiedlichen Kompetenzen so zusammengestellt, dass die verschiedenen FuE-Aufgaben erfolgreich bearbeitet werden konnten.

Die MRC Systems GmbH übernahm die Systemführerschaft und sollte die von den Partnern erstellten Komponenten in das Gesamtsystem integrieren. Außerdem sollte das KMU die für Medizinprodukte erforderlichen Anforderungen bezüglich Risiken und Ergonomie adressieren sowie die experimentelle Untersuchung des Operationsroboters unterstützen.

Die Binder Elektronik GmbH sollte die Verbundpartner bei der Auslegung der elektronischen Komponenten unterstützen und mikroelektronische Module und Baugruppen für die Steuerung des Operationsroboters und den Aufbau des Trackingsystems entwickeln und fertigen.

Die Sektion experimentelle Orthopädie und Unfallchirurgie an der Medizinischen Fakultät Mannheim der Universität Heidelberg sollte mechanische und elektromechanische Prototypen, Komponenten und Versuchsaufbauten entwickeln, konstruieren und fertigen. Außerdem sollte sie die klinischen Rahmenbedingungen für einen Einsatz des Operationsroboters einbringen und unterschiedliche Experimente an Modellkörpern und mit in-vitro-Material durchführen.

Der Lehrstuhl für Automation am Institut für Technische Informatik der Universität Heidelberg sollte Algorithmen für die zwischen Mensch und Operationsroboter agierende Regelung entwerfen und implementieren, Sensoren und ein Zielsystem integrieren und Vorversuche durchführen.

Das EMB-Forschungslabor der Hochschule Mannheim sollte das schnelle Trackingsystem entwickeln. Im Mittelpunkt dieser Arbeiten stand dann auch die Entwicklung und Charakterisierung einer eigenen Kameraplattform.

Der Arbeitsplan war in mehrere Phasen unterteilt, an deren Ende unterschiedliche Meilensteine definiert waren. Er war in insgesamt 29 Arbeitspakete gegliedert, für deren Ausführung jeweils ein Verbundpartner verantwortlich zeichnete, an denen aber teilweise mehrere Verbundpartner beteiligt waren. Insgesamt war eine enge Zusammenarbeit der Verbundpartner erforderlich, da die einzelnen Komponenten des Operationsroboters sich gegenseitig beeinflussten. Um diese Zusammenarbeit zu befördern und einen regelmäßigen Austausch der Akteure sicherzustellen, wurde über die gesamte Projektlaufzeit ein festes, monatliches Treffen an wechselnden Standorten gepflegt. Dies war aufgrund der räumlichen Nähe der am Vorhaben beteiligten Institute und Unternehmen möglich. Außerdem wurden jährlich größere Verbundtreffen durchgeführt, die den Charakter von Design Review Meetings hatten.

4) Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden und Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Auf Basis der Ergebnisse einer ausgiebigen Recherche war die Idee der Kombination aus Robotik und Navigation zu einem handgehaltenen robotischen Instrument für den operativen Einsatz in der Chirurgie entstanden. Das Ziel war, ein Instrument zu konzipieren, mit dem geplante Trajektorien (Bearbeitungsbahnen) im Knochen mit einer hohen Präzision realisiert werden können, und den Arzt aktiv in den Operationsprozess zu integrieren. Die Akzeptanz von robotischen Systemen für den operativen Einsatz soll damit deutlich erhöht werden.

Die bekanntesten in den Bereich der Orthopädie und Unfallchirurgie fallenden Operationsroboter waren Robodoc® und Caspar. Sie hatten aber die Erwartungen der Anwender bzw. der Patienten im klinischen Einsatz nicht immer befriedigen können. Das konnte einmal auf ihre Größe (Sperrigkeit) zurückgeführt werden, aber auch auf die Situation, dass bei diesen aus der Industrie entlehnten Systemen der Arzt an der Operation selbst manipulatorisch nicht mehr teilnimmt.

Nach unserem Stand des Wissens waren zu Projektbeginn sieben Systeme (einschließlich ITD) beschrieben, bei denen eine Maschine in der Hand des Benutzers gehalten wird und die den Tremor oder unbeabsichtigte Bewegungen des Operateurs kompensieren und das Werkzeug gegenüber dem Werkstück bzw. dem Patienten stabilisieren kann. Die beschriebenen Systeme waren für mikrochirurgische Eingriffe konzipiert. Eines davon stabilisierte ein Endoskop bei der Kniearthroskopie. Andere Systeme definierten sog. „no go areas“, so dass Arbeiten mit dem Werkzeug nur in bestimmten Bereichen erfolgen können.

Es ließ sich noch eine weitere Systemgruppe (sog. active constraints) abgrenzen, wo das Werkzeug über einen robotischen Arm „getragen“ und die Bearbeitung vom Benutzer selbst durchgeführt, das Werkzeug aber nicht wirklich in der Hand gehalten wird.

Ein prinzipielles Problem bezüglich der Lageregelung mehrachsiger robotischer Maschinen ist das Erreichen einer hohen Dynamik bei gleichzeitig hoher Präzision. Zur Lösung dieses Problems sind modellbasierte Methoden weit verbreitet. Durch eine geeignete Modellierung der Maschinendynamik und eine Vorsteuerung der dynamischen Kräfte können Positions- und Bahnfehler teilweise kompensiert werden. Diese Lösung hängt jedoch stark von der Genauigkeit des Modells und der Sensorik (Trackingsystem) ab. Der Ansatz des FuE-Vorhabens basierte daher darauf, dass die Übertragung unbeabsichtigter Bewegungen des Operateurs (Tremor, Drift) auf das Bearbeitungswerkzeug mit der modellbasierten Regelung einer hoch dynamischen und leichten Parallelkinematik reduziert werden kann. Hierzu müssen alle modellierten Bewegungsvariablen mit einer hohen Präzision zur Verfügung stehen.

Im Stand der Technik verfügbare Hochpräzisions-Trackingsysteme waren aus zwei bis drei Kameras zusammengesetzt. Dieser starre Aufbau erschwerte eine Anpassung des verfügbaren Trackingvolumens. Deshalb fehlte ein Trackingsystem mit einem skalierbaren Kameranetzwerk, das die dynamischen und statischen Anforderungen eines Einsatzes in der Roboterunterstützten Chirurgie erfüllte. Hierzu sollten neuartige „intelligente“ DSP-Kameras verwendet werden, welche als autonome Bildverarbeitungs-komponenten zu einem Netzwerk zusammengeschaltet werden können.

Zusammenfassend konnte eine hohe Forschungs- und Entwicklungsaktivität und ein hoher Bedarf auf dem Gebiet der roboterunterstützten Chirurgie festgestellt werden.

Eine Aussage, die wir zu Beginn des FuE-Vorhabens formuliert hatten, kann auch nach Projektabschluss wiederholt werden: Nur wenige Systeme haben es zum klinischen Einsatz „geschafft“, was wir u. a. auf die Sperrigkeit der bisher eingesetzten Roboter zurückführen. Durch die Bereitstellung handgehaltener robotischer Instrumente für den operativen Einsatz

sollte die Akzeptanz von Seiten des Arztes deutlich zunehmen, weil er damit die Operation selbst aktiv führen und kontrollieren kann. Der Einsatz von robotischen Instrumenten ist gewünscht, um die geplanten Bearbeitungsschritte mit hoher Präzision umsetzen zu können. Die prinzipielle Akzeptanz robotischer Verfahren bei minimalinvasiven Eingriffen zeigt sich z.B. durch die zunehmende Verbreitung des amerikanischen Systems daVinci insbesondere in der Urologie.

Die Entwicklung der handgehaltenen Robotik war bereits durch die DFG im Rahmen des SPP1124 (SCHA 952/1-1, MA 1150/39-1) und durch die AiF im Rahmen von PROINNO II (KF 0421201 MB6: Uni HD Labor für Biomechanik und experimentelle Orthopädie; KF 0610501MB8: UNI HD LS Automation, Lehrstuhl f. Informatik V; KF 0419001MB6: Fa. MRC, Heidelberg; KF 0357002MB6: Fa. VRmagic, Mannheim) gefördert worden. In diesem Rahmen war ein erstes Labormuster realisiert worden. Dieses besaß eine sog. Hexaglide-Kinematik, die von Linearmotoren angetrieben wurde und die freie Bewegung mit 6 Freiheitsgraden im Raum möglich machte. Zur Lagestabilisierung des Werkzeugs war eine kaskadierte modellbasierte Regelung eingesetzt worden. Zu Beginn des Vorhabens existierte somit ein System, mit dem Fräsungen in Form von Bohrungen in Schaumstoffmaterial eingebracht werden konnten. Das System erlaubte aber noch keinen stabilen Betrieb, und es war zu schwer und zu groß.

Das Konzept und die Ausführung des ITD sind in einem international angemeldeten Patent [PCT / DE 2003/002846] rechtlich geschützt.

5) Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Implantat- und Instrumentenhersteller Aesculap war beratend in das FuE-Vorhaben eingebunden. Im Fortschritt des Projekts steuerte er neben seiner technischen Expertise und Marktkenntnis auch verschiedene Werkzeuge, Werkzeugantriebe und Schablonen bei, die erlaubten, die experimentellen Arbeiten im Vorhaben mit klinisch bereits eingesetzten Komponenten durchzuführen.

II. Eingehende Darstellung

1) Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

A) Konzeption und Entwicklung des Tracking Konzepts

Gesamt Konzept

Die Aufgaben des Trackingsystems sind die Erfassung der Position und Lage des handgehaltenen Operationsroboters, des Werkzeugs und des Patienten im OP-Raum. Diese Information wird zur Regelung des ITD eingesetzt.

Die Erarbeitung der Anforderungen an das Trackingsystem war essentiell für die Auswahl der Komponenten des Trackingsystems sowie Bestimmung und Entwicklung der erforderlichen Algorithmen zur Sensordatenverarbeitung.

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden die Ansatzpunkte (Roboter, Werkzeug, Patient) und Spezifikation des Trackingsystems bezüglich der Größe des Arbeitsraumes, geforderter Genauigkeit und Präzision, Latenz, Bandbreite und Updaterate analysiert.

Aufgrund der hochdynamischen Bewegungen des handgehaltenen Operationsroboters bzw. des geführten Werkzeuges, die in der Regelschleife des ITD kompensiert und anhand der festgelegten Trajektorien geführt werden sollen, ergaben sich insbesondere hohe Anforderungen an eine geringe Latenz des Trackingsystems.

Die Abdeckung des Arbeitsraums soll individuell an die Situation im Operationssaal angepasst werden können, um einen Betrieb möglichst frei von Verdeckungen sicherstellen zu können.

Aufgrund der hochdynamischen Bewegungen des handgehaltenen Operationsroboters bzw. des geführten Werkzeuges, die in der Regelschleife des ITD kompensiert und anhand der festgelegten Trajektorien geführt werden sollen, ergaben sich insbesondere hohe Anforderungen an eine geringe Latenz des Trackingsystems. Deshalb wurde eine Kombination aus optischen und inertialen Sensoren gewählt, diese komplementären Modalitäten bilden ein hybrides Tracking System. Das optische Tracking bietet eine hohe absolute Genauigkeit und Präzision bei einer begrenzten Bandbreite, kann jedoch durch das OP-Personal und Werkzeuge verdeckt werden. Das inertielle Tracking verwendet Sensoren mit hoher Bandbreite direkt am Roboter und ist dadurch gegen Abschattung resistent.

Die Bestimmung von relativer Position und Orientierung erfolgt beim inertialen Tracking durch Integration der Sensordaten (Beschleunigung und Drehrate). Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass auch die Fehler integriert werden und somit über die Zeit anwachsen. Dies muss durch eine geeignete Datenfusion mit den optischen Trackingdaten kompensiert werden (siehe Abbildung 1).

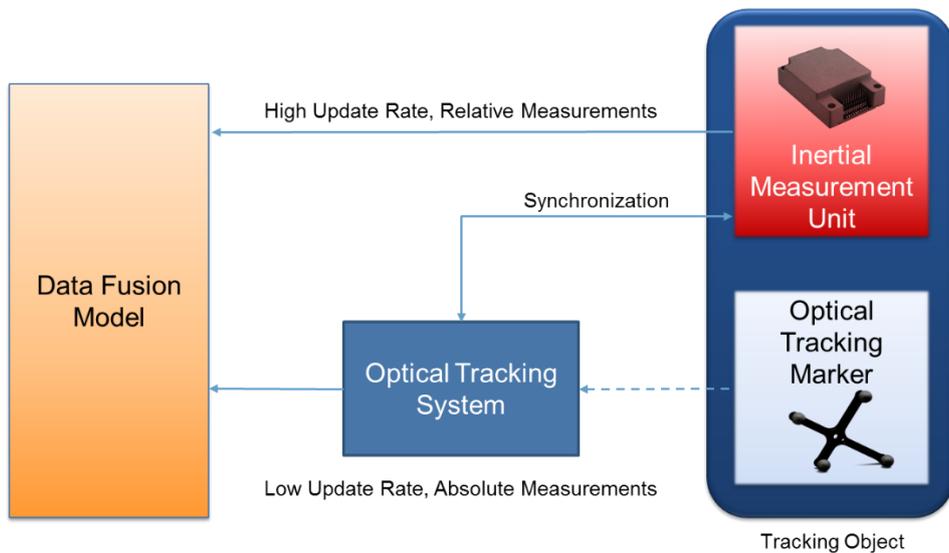


Abbildung 1: Blockschaltbild des Hybriden Trackingsystem Prinzips

Abbildung 2 zeigt das Blockdiagramm des Hybriden Trackingsystem mit Anbindung an die Steuerung des ITD-Roboters. Die Abdeckung des Arbeitsraums soll individuell an die Situation im Operationssaal angepasst werden können. Das aus einer unbestimmten Anzahl von Kameras bestehende modulare Trackingsystem ist hierfür am besten geeignet, da im Gegensatz zu klassischen stereo-optischen Trackingsystemen die geometrische Konfiguration der Kameras und des Arbeitsraumes individuell anhand der für die geplanten Eingriffe vorgegebenen Bedingung und räumlichen Gegebenheiten anpassbar sind.

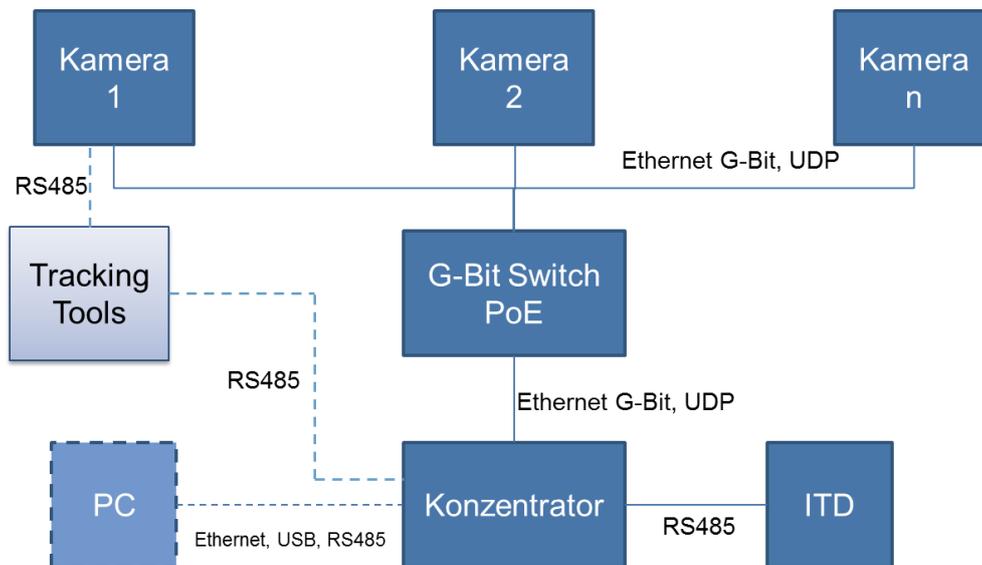


Abbildung 2: Blockdiagramm Hybriden Tracking Systems

Zur Realisierung des hybriden Trackingkonzepts wurden notwendige Konzepte für die Systemkomponenten erarbeitet. Diese beinhalten ein Konzept für die intelligenten Kameras, Konzentrator, Sensorkomponenten sowie Algorithmen für die Bildverarbeitung und Datenfusion.

Kamera Konzept

Modular skalierbare Trackingsysteme sind zwar bereits kommerziell verfügbar, allerdings erfüllen diese weder die Genauigkeits- noch Latenz-Anforderungen an ein durch Tracking gestütztes Robotersystem im medizinischen Umfeld. Aus diesem Grund wurde eine neue „Intelligente“ Hochleistung-Kamera entwickelt, welche im Gesamtsystem diese Anforderung erfüllen kann. Aufgrund der Anforderung an geringer Latenz ist es notwendig bereits einen Großteil der Bilderverarbeitung in der Kamera zu realisieren. Bedingt durch die geforderten Arbeitsräume und hohen absoluten Anforderungen an die Genauigkeit war der Einsatz eines Hochauflösenden Bildsensors notwendig. Um die höchst mögliche Genauigkeit zu erreichen, wurde ein Sensor gewählt welcher die Anforderungen eines Trackingsystems (Global Shutter und Bildrate größer als 50Hz) erfüllt, und die höchste zu dem Zeitpunkt erhältliche Auflösung bietet. Der einzige auf dem Markt zu Forschungszwecken verfügbare Bildsensor der gleichzeitig dies Anforderungen erfüllt war der Vita25K von On Semiconductors mit einer Auflösung von 25MP und Bildrate von 53Hz. Dieser Sensor bietet eine theoretische Grundgenauigkeit die um eine Größenordnung besser als die geforderte Genauigkeit des Gesamtsystems (Roboter und Trackingsystem) ist.

Die durch diesen Bildsensor erzeugte Datenmenge liegt im Bereich von ca. 1.1GB/Sekunde welche im Hinblick auf den Einsatz mehrerer Kameras zu hoch für gängige Bus- und Verarbeitungssysteme ist. Von daher ist eine „intelligente“ Kamera Lösung notwendig, welche in der Lage ist die wesentlichen Daten für das Tracking am Ort des Entstehens vor zu verarbeiten. Hierfür wurde als Hauptrecheneinheit eine kombinierte Lösung aus FPGA und Dual-Core Cortex A9 von Xilinx (Zynq) gewählt. Dies ermöglicht eine Effiziente Übergabe durch Parallele Verarbeitung im FPGA reduzierten Daten an die komplexen Bildverarbeitungsalgorithmen welche sich aufgrund ihrer Struktur besser in Software auf den Cortex A9 Prozessoren realisieren lassen. Abbildung 3 zeigt das Prinzipielle Blockschaltbild und den Datenfluss der „intelligenten“ Kamera (Smart-Cam).

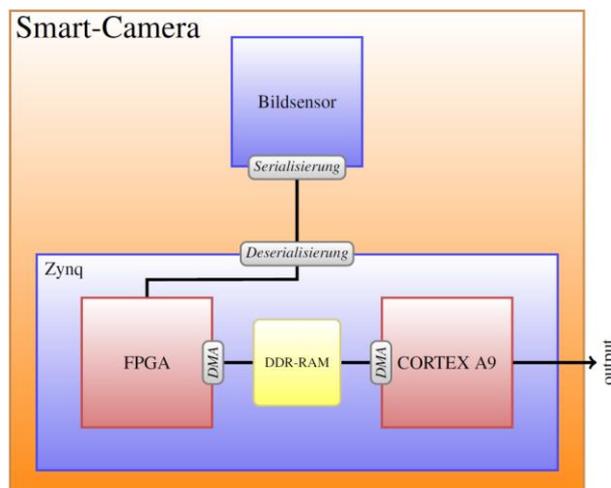


Abbildung 3: Konzept der „intelligenten“ Kamera

Die physikalischen/analogen Bilddaten werden vom Sensor in einen digitalen Datenstrom gewandelt und über mehrere parallele Interfaces bestehend aus seriellen Kanälen zum Zynq transportiert. In Abbildung 4 ist der prinzipielle Verarbeitungsablauf innerhalb des Zynq dargestellt. Nach der Übernahme der Bilddaten in den FPGA/Zynq erfolgt die Reduktion der

Daten durch Schwellwert-basierte Segmentierung und auf Regionsmerkmalen basierender Filterung.

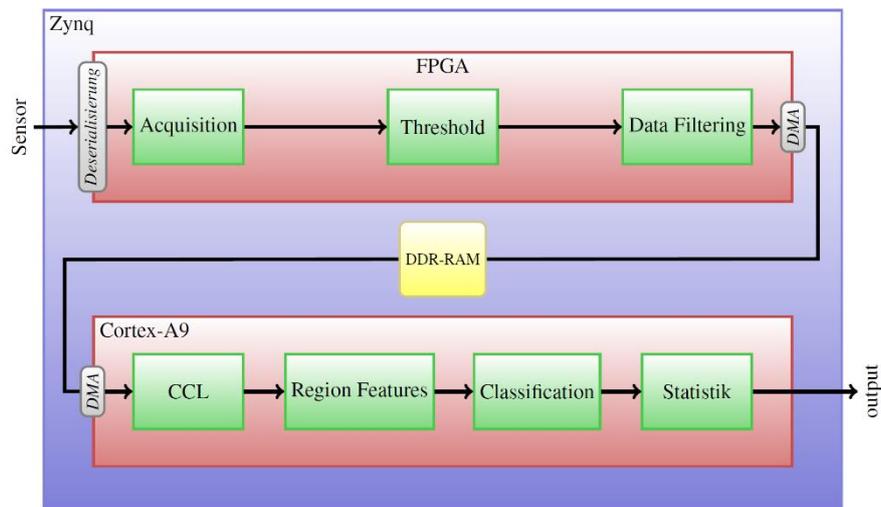


Abbildung 4: FPGA Image-Processing Pipe-Line

Die Berechnung der Positionen, Orientierung, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Tracking-Tools, sowie die Datenfusion kann nur in einer zentralen Einheit erfolgen, welche die Daten von allen Kameras gleichzeitig zur Verfügung hat. Hierfür übertragen die Kameras das Ergebnis der Vorverarbeitung über ein Bussystem z.B. Gigabit Ethernet an die Zentrale Einheit (Konzentrator).

IMU Sensor Konzept

Um das hybride Tracking von Objekten zu ermöglichen wurde ein Konzept für ein im ITD-Roboter verbautes hybrides Tracking-Tools bestehend aus einem Beschleunigungs- und Drehratensensor und optischem Marker sowie Verarbeitungs-, Synchronisierung- und Übertragungseinheit erarbeitet (ITD-IMU).

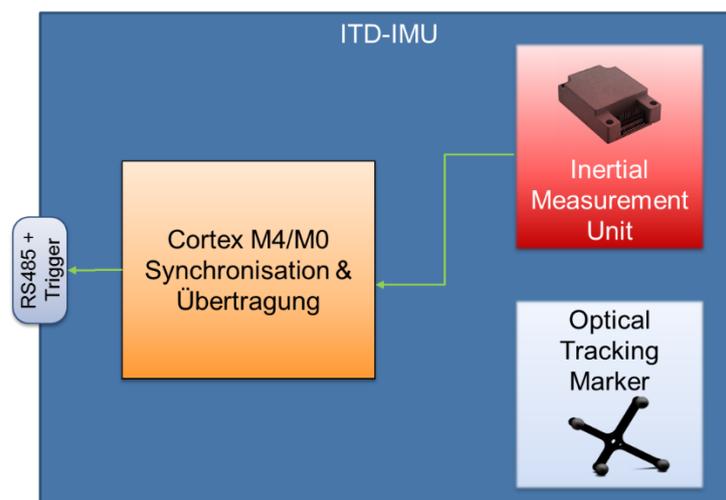


Abbildung 5: Blockdiagramm für die ITD-IMU Sensoreinheit

Zur Erfassung der inertialen Sensordaten wurde eine integrierte IMU (Inertial Measurement Unit) mit kalibrierten Achsen und einer Abtastrate von 1.2kHz gewählt, die über eine serielle Schnittstelle mit der Synchronisations- und Übertragungseinheit verbunden sind (siehe Abbildung 5). Als Schnittstelle für die Datenübertragung und Synchronisation zum Konzentrator dient ein differentieller Datenbus (RS485/RS422) mit erhöhter Störfestigkeit bei gleichzeitig

hoher Datenrate von größer 3Mbit/Sekunde. Die Herausforderung bei dieser Teilkomponente bestand in der schwierigen Integration durch die begrenzten Platzverhältnisse und Gewichtsvorgaben des handgehaltenen Roboters.

Datenfusions Konzept

Die aus den unterschiedlichen, komplementären Trackingmodalitäten (optisch, inertial) stammenden Daten müssen zur Generierung von hoch dynamischen und gegen Ausfälle robusten Navigationsdaten zeitlich und räumlich fusioniert werden. Hierfür wurde ein Konzept basierend auf dem sogenannten „Extended Kalman Filter“ (EKF) gewählt. Dieses modellbasierte Filter (Abbildung 6) ermöglicht bei korrekter Anwendung eine optimale Fusion der Zustandsdaten eines nicht linearen Systems.

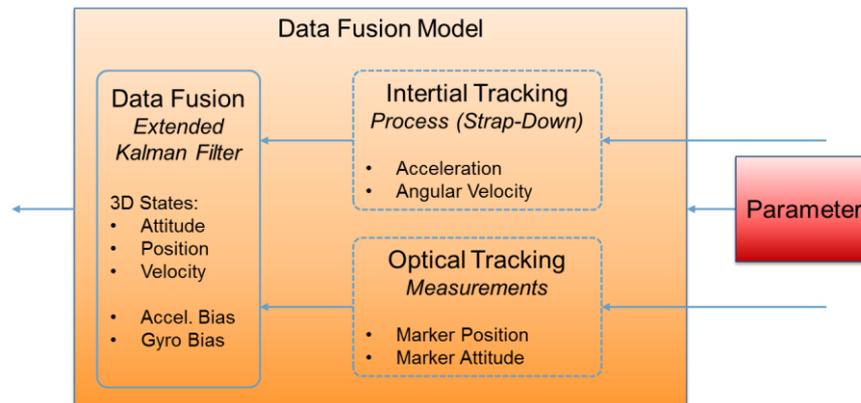


Abbildung 6: Model der Datenfusion mit „Extended Kalman“ Filter

Hierbei werden die inertialen Daten als Modellprozess in einem sogenannten „Strap-Down“ Algorithmus verarbeitet wobei aus den Beschleunigungs- und Drehraten die relative Änderung der Geschwindigkeit und Position berechnet werden. Da diese jedoch mit einem zeitlich ansteigenden Fehler, durch die Integration der Sensordaten, behaftet ist, muss diese durch ein absolut messendes System gestützt werden. Dies geschieht bei dem hier verwendeten EKF in der sogenannten „Update-Phase“, wobei die Gewichtung der einzelnen Modalitäten optimal auf Grund der Prozess- und Messmodelle erfolgt. Eine Besonderheit liegt hier darin, dass die beiden Modalitäten mit stark unterschiedlichen Abtastraten (50Hz bei dem optischen System gegenüber von 1kHz bei dem inertialen System) arbeiten und die Daten zeitlich versetzt entstehen, was beim Design des Filters berücksichtigt werden muss um die geforderte Erhöhung der Trackingdynamik zu erreichen.

B) Schnittstellen des Trackingsystems zum Gesamtsystem des ITD's

Ein weiterer Teil der Arbeit umfasste die Einbindung des hybriden Trackingsystems in das Gesamtsystem bestehend aus ITD-Roboter und ITD-Steuerung sowie der Sensoreinheit ITD-IMU und das Hybride Trackingsystem mit dem Konzentrador (Fusionbox). Die Abbildung 7 zeigt das Blockdiagramm der Schnittstellen der Komponenten des Gesamtsystems zur Fusionbox. Als Referenz- und zur Erforschung des hybriden Trackings wurde für die Realisierung eines Prototyps des Konzentrators zunächst ein im Labor vorhandenes, kommerzielles medizinisches Trackingsystem verwendet (Northern Digital Imaging – Polaris Spectra) verwendet.

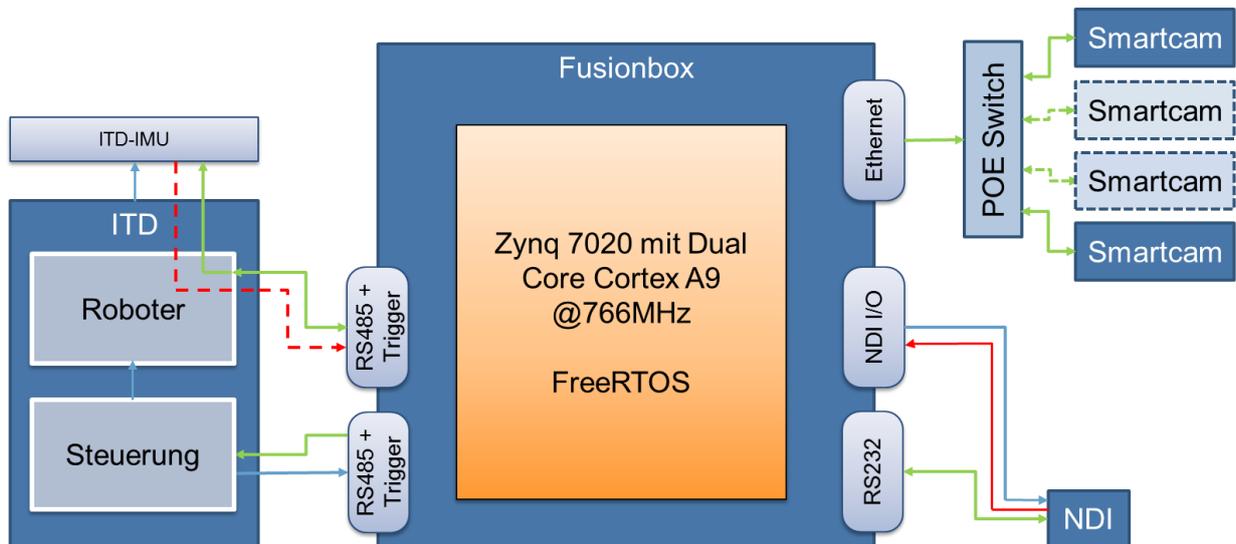


Abbildung 7: Schnittstellen Konzentrador (FusionBox) mit Zusatz Schnittstellen für Versuchsaufbau mit Referenz Trackingsystem von Northern Digital Imaging (NDI)

Der Kern des Konzentrators wurde auf Basis des auch in der Kamera verwendeten System-on-Chip (SoC) von Xilinx realisiert, da zum einen hier die Hardware für die Schnittstellen optimal an die Anforderungen angepasst werden konnten, zum anderen die Werkzeuge zur Entwicklung und Implementierung der Echtzeit-Algorithmen in gleicherweise verwendet werden konnten.

Die Hardware des Prototyps besteht aus einer im Labor entwickelten Schnittstellenträgereinheit und einer Entwicklungsplattform für den Xilinx SoC Zynq. Die Schnittstellenträgereinheit erweitert die Entwicklungsplattform um die differentiellen RS485/RS422 sowie Synchronisationsschnittstellen mit dem Gesamtsystem und der ITD-IMU (Abbildung 8).

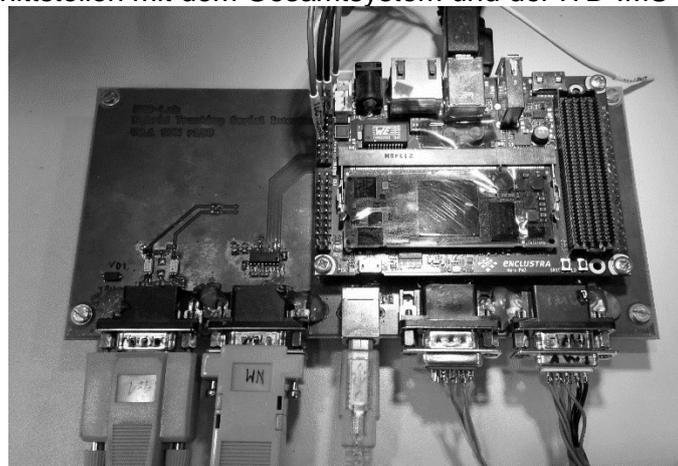


Abbildung 8: Konzentrador Fusionbox Prototyp

Die Firmware der Fusionbox beinhaltet eine zeitliche Synchronisation der Datenaufnahme von Inertialen- und Trackingdaten und der ITD-Roboterregelung. Die im Datenfusions Konzept beschriebenen Algorithmen wurden hier implementiert. Um die Echtzeitfähigkeit des Systems zu garantieren wurde ein Real-Time-Operating-System (RTOS) eingesetzt. Dies war notwendig um die Datenflüsse der Schnittstellen und den Trackingalgorithmen mit Hilfe von priorisierten Tasks zu synchronisieren.

Schnittstellen Protokoll

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde ein Schnittstellenprotokoll zwischen dem Trackingsystem und der ITD-Steuerung definiert. Als Grundlage dient ein Datenstrom (engl. Stream) welcher aus einem Header und einem Payload besteht (Abbildung 9). Der Header beinhaltet zum einen eine eindeutige Identifikation des zum Datenstrom gehörigen Trackingsystems sowie Informationen über den aktuellen Zustand. Dies dient unter anderem auch zur Signalisierung von Fehlerzuständen des Trackingsystems welche von der ITD-Steuerung entsprechend behandelt werden können.

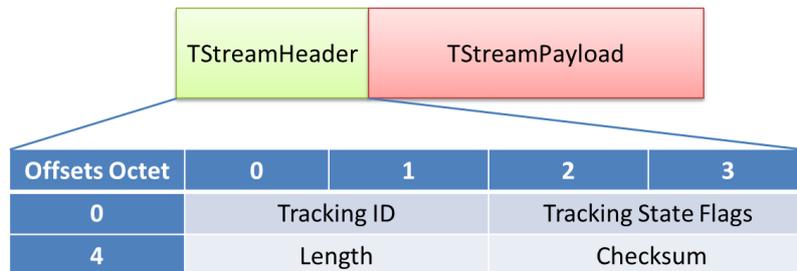


Abbildung 9: Tracking Daten Stream Header mit Status Informationen

Die im Normalbetrieb wichtigsten Informationen sind die Navigationsdaten für den Roboter und Patienten. Diese Daten müssen die eindeutige Identifizierung des Objektes (Tool ID) sowie Position und Orientierung der Objekte im Raum beinhalten. Hierfür wurde ein Datenpaket (siehe Abbildung 10) entworfen welches diese Informationen enthält.

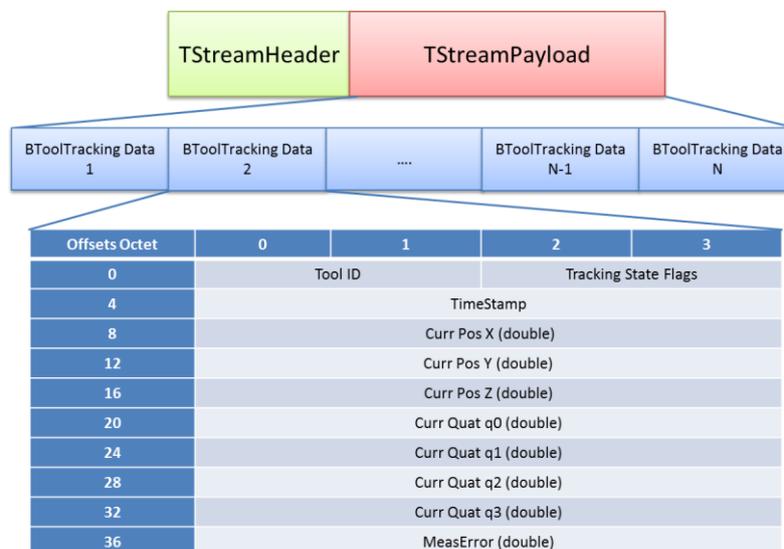


Abbildung 10: Tracking Daten Stream mit Normalen Trackingdatenpaket

Da für die ITD-Regelung auch erweiterte Informationen, welche zum Teil Zwischenergebnisse der Datenfusion sind, zur Erhöhung der Gesamtdynamik des Roboters benötigt werden, wurde ein erweitertes Datenpaket (siehe Abbildung 11) eingeführt welches zusätzlich zu den Standard Informationen noch Geschwindigkeit und Beschleunigungen beinhaltet.



Abbildung 11: Erweitertes Trackingdatenpaket

C) Implementierung und Aufbau der Trackingsystem Komponenten

Kamera

Die Erarbeitung von Lösungen für das Kamerakzept, Entwicklung von Hard- und Software sowie Implementierung und Realisierung des Prototyps erfolgte in drei Abschnitten und in Zusammenarbeit mit den Projektpartner Binder Elektronik GmbH.

Um den Entwicklungsaufwand für die Kamera zu reduzieren, wurde auf ein SoC-Modul der Firma Enclustra GmbH zurückgegriffen, welches bereits sämtliche Elektronik (Spannungsversorgung, Speicher, Schnittstellentreiber) für den Betrieb des Zynq SoC bietet. Diese Modularisierung ermöglicht auch den Austausch des Moduls mit einem leistungsfähigeren Modul für die Anbindung des Bildsensors und Bildverarbeitung. Die größte Herausforderung bestand hier in der Schaltungsentwicklung zur Anbindung des Bildsensors an das SoC-Modul. Auf Grund der High-Speed Datenschnittstelle war es notwendig die parallelen LVDS (Low-Voltage-Differential-Signaling) Kanäle mit einem Längenausgleich zu versehen, der die Laufzeitdifferenz soweit reduziert sodass der Abgleich mit durch den FPGA bereitgestellten Latenzanpassungsmöglichkeiten möglich wird.

Da der Bildsensor im Prinzip einen Analog-Digital-Wandler darstellt ist dessen Bildqualität maßgeblich durch die Qualität der Spannungs- und Stromversorgung gegeben. Hier musste vor allem eine Kompensation der transienten Schaltvorgänge und das geringe Rauschen berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf den Einsatz als Teil eines hybriden Trackingsystems mit der Fusion von inertialen und optischen Daten wurde hier auch eine hoch integrierte Beschleunigungs- und Drehratensensor integriert um die Gesamtgenauigkeit des hybriden Tracking zu erhöhen.

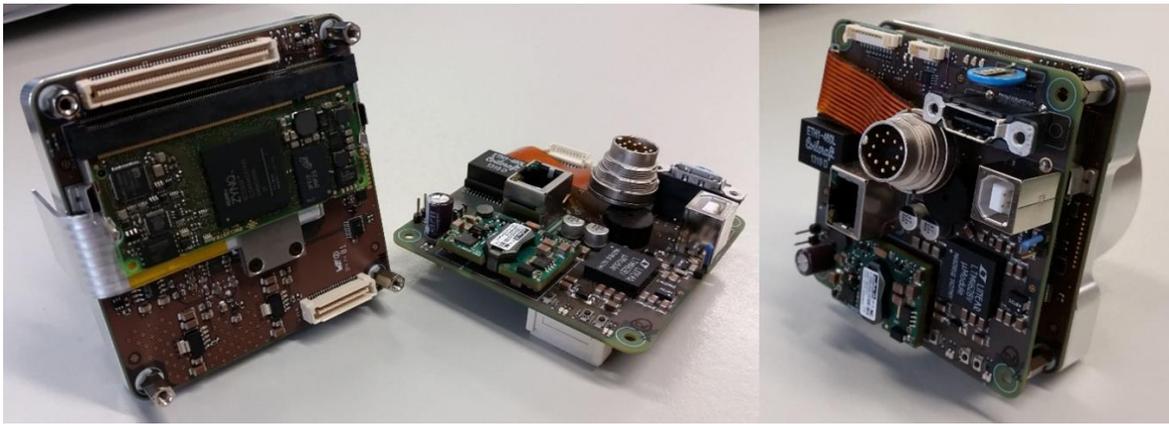


Abbildung 12: Aufgebauter Prototyp der Kameramodule

Die Sensoreinheit (Sensor-Board) der Kamera wurde komplementär ergänzt durch ein Schnittstellen-Modul (Connector-Board). Dieses Modul bietet verschiedene Schnittstellen zur Entwicklung der FPGA-SoC Firmware (JTAG, USB, HDMI, Ethernet, General Purpose IOs) zur Verfügung. Um ein möglichst unabhängiges System mit geringem Aufwand zu installierenden Komponenten zu ermöglichen, wurde auf eine Energieversorgung durch den Power-over-Ethernet (PoE) Standard gesetzt. Hierbei erfolgt die Energieversorgung durch das Ethernetkabel und bildet somit das einzige Kabel für den Betrieb einer Kamera. Die Energie muss über ein PoE-Injektor eingespeist werden. Für das modulare hybride Trackingsystem wurde hierfür ein Multi-Port PoE Switch, welcher mehrere Kameras mit Energie versorgen kann, eingesetzt. Die Umsetzung (Layout und Produktion) der vom EMB-Lab vergebenen Schaltung für die Kamera Module wurde von dem Projektpartner Binder Elektronik GmbH umgesetzt (Abbildung 12).

Neben der Realisierung der Elektronik musste ein Mechanisches Konzept zur Kühlung des Bildsensors und FPGA-Moduls erarbeitet werden. Hierbei wurde ein Gehäuse konstruiert, welches mit Hilfe von Kühlrippen eine optimale Abgabe der Wärme an die Umgebung gewährleistet. Um innerhalb der Kamera die Wärme von Komponenten an den Kühlkörper des Gehäuses zu leiten, wurden sogenannte Heat-Pipes verwendet. Die Abbildung 13 zeigt den aufgebauten Kameraprototyp mit dem Kühlgehäuse und Objektiv, sowie eine Schematische CAD (Computer-Aided-Design) Darstellung welche die Anbindung der Komponenten über die Heat-Pipes an das Gehäuse zeigt.



Abbildung 13: Aufgebauter Kamera Prototyp und schematische Darstellung des Kameraaufbaus

Die mechanische Fertigung des Gehäuses, sowie für die Fixierung der Heat-Pipes notwendigen Komponenten wurden durch EMB-Lab durchgeführt und aufgebaut.

Um die geforderte individuelle Anpassung des Arbeitsraums zu erreichen, wurde ein Standardobjektivhaltersystem des Typs F-Mount verwendet. Dies ermöglicht eine größtmögliche Auswahl an Objektiven die für die hohe Auflösung und physikalische Größe des Bildsensors geeignet sind.

Die im Kamerakzept vorgesehene Vorverarbeitung und Reduktion der Bilddaten sollte mit Hilfe des SoC erfolgen. Hierfür waren zwei Arbeitsschritte notwendig. Zum einen die Entwicklung und Implementierung der FPGA Pipeline/Architektur in der programmierbaren Logik (PL) und zum anderen die Implementierung der Software für die komplexen Bildverarbeitungsalgorithmen auf dem Cortex A9 (PS) des SoC. Die Realisierung erfolgte im Rahmen von mehreren Abschlussarbeiten am EMB-Lab (siehe Kapitel „6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses“). Das Ergebnis dieser Arbeiten wurde wie in der Abbildung 14 gezeigt Architektur/Pipeline umgesetzt. Die Bilddatenkanäle des Sensors müssen zunächst zueinander synchronisiert und deserialisiert werden um das eigentlich empfangene Bild zu rekonstruieren.

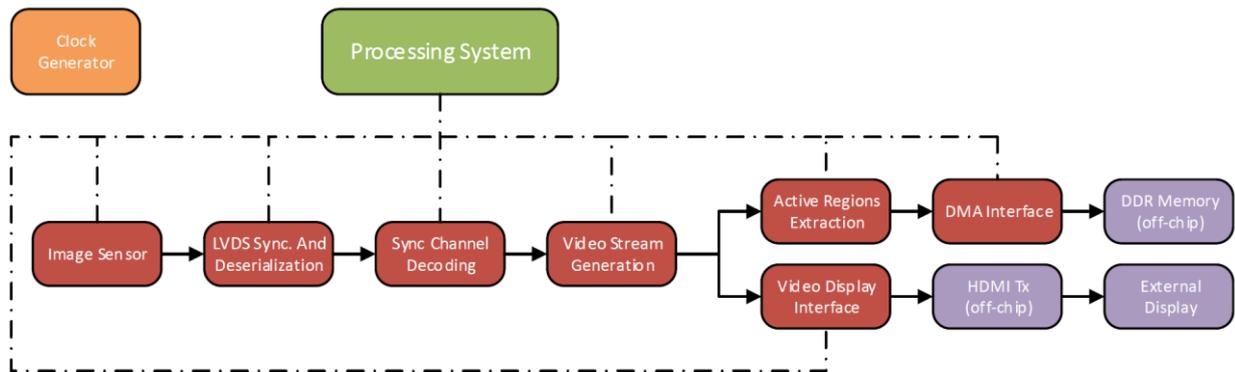


Abbildung 14: FPGA Pipeline/Architektur

Dabei werden die verschiedenen Taktsignale wie Pixeltakt, Zeilentakt und Bildrate als sogenannter Video Stream an die weitere Pipeline übergeben. Exemplarisch für die Taktgenerierung und Synchronisierung ist in Abbildung 15 das implementierte FPGA Modul „Clock Generator“ gezeigt, welche mit Hilfe einer Phase-Locked-Loop (PLL) die externe Logik des Sensor sowie die interne Logik des PL synchronisiert.

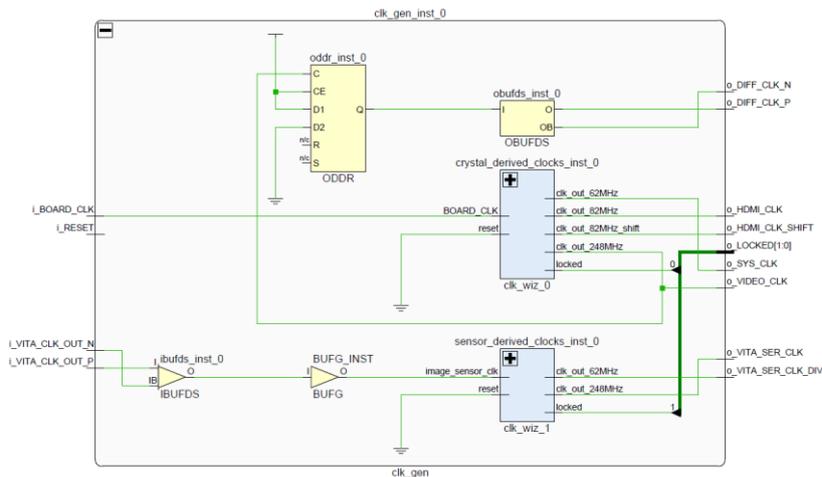


Abbildung 15: FPGA Blockdesign zur synchronen Taktsignal-Generierung für den Kamera Sensor

Nachdem alle notwendigen Blöcke für die FPGA Pipeline/Architektur entwickelt und in einer Testumgebung auf ihre Funktion geprüft wurden, wurden diese im nächsten Schritt in einem sogenannten „Place & Route“-Verfahren an das eigentlich verwendete SoC generiert.

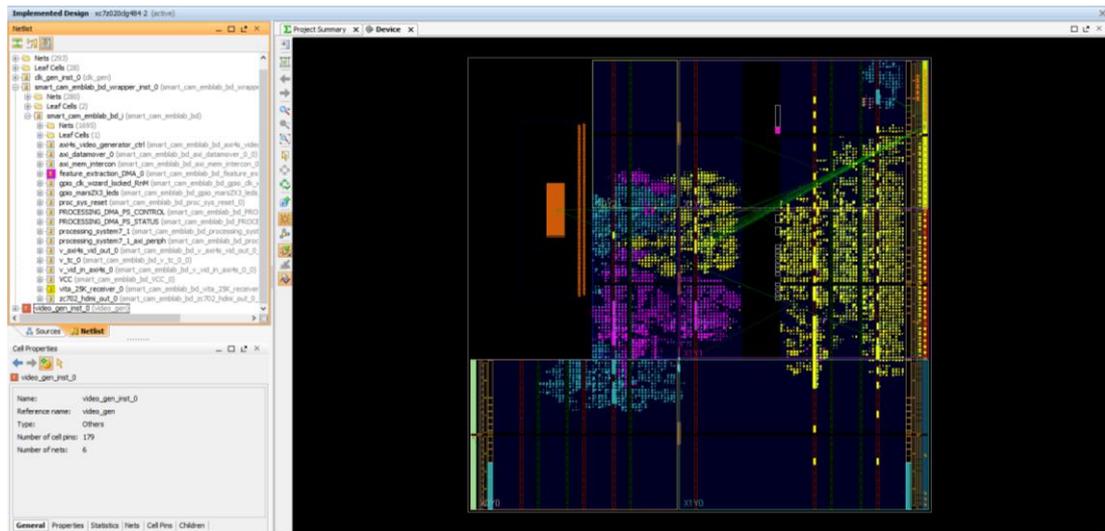


Abbildung 16: Plaziertes und Geroutetes FPGA Design der Kamera Logic im FPGA

Abbildung 16 zeigt dieses generierte FPGA Design für den SoC. Herausforderung hier war es, die Zeitabhängigkeiten aller Signale der Logik in der physikalischen Implementierung im FPGA einzuhalten. Hierfür wurden mehrere Iterationsschritte zur Optimierung der FPGA Module vorgenommen, um ein synchrones Design zu erhalten.

Sobald ein Bild in der PL vorverarbeitet ist, wird dieses über den Arbeitsspeicher an das PS zur Weiterverarbeitung übergeben. Hier war es notwendig, eine geeignete Schnittstelle zu definieren, welche möglichst einfach zu implementieren ist und geringe Latenzen auf beiden Seiten der Schnittstelle ermöglicht.

Die Weiterverarbeitung durch das PS erfolgt durch Tasks welche in Echtzeit durch ein RTOS verwaltet und gesteuert werden. Dies ermöglicht die priorisierte Bearbeitung der Aufgaben innerhalb des PS, welche neben der Bildverarbeitung auch die Übertragung der Ergebnisse dieser an den Konzentrador beinhalten.

IMU Sensorik

Die Umsetzung Elektronik für das hybride Tracking-Tool für den ITD Roboters erfolgte am EMB-Lab. Dies beinhaltet sowohl die Auswahl der Komponenten und die Erarbeitung des Schaltplans als auch die Umsetzung des Leiterplatten Layouts und die Fertigung (Bestückung und Inbetriebnahme).

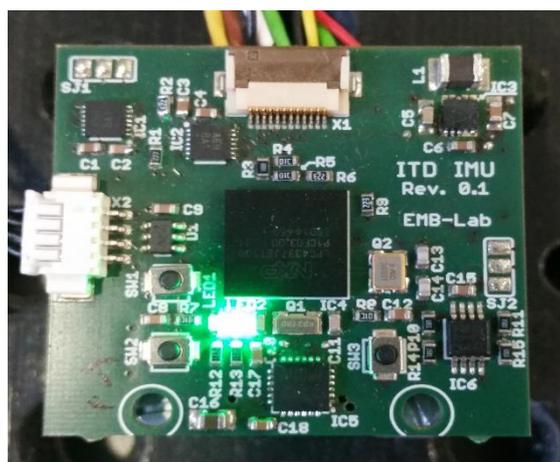


Abbildung 17: Embedded System für die IMU Sensorik

Die Herausforderung hierbei bestand in der Miniaturisierung und Integration aller Komponenten auf die durch den geplanten Einbau in den ITD-Roboter begrenzten Raumverhältnissen. Aus diesem Grund wurden die physikalischen Dimensionen, Einbaulage und Befestigung der Elektronik mit Hilfe von CAD Modellen zunächst ermittelt (siehe Abbildung 18).

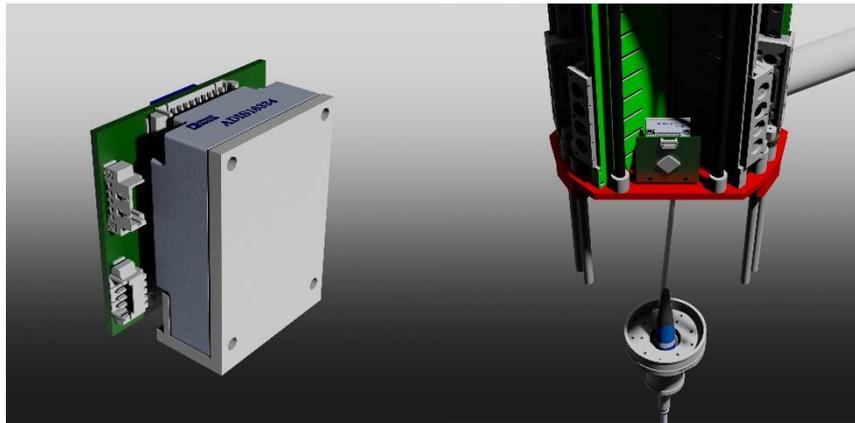


Abbildung 18: ITD IMU Sensor mit Hochgenauer IMU

Neben den im Konzept geforderten Schnittstellen wurden weitere Funktionen vorgesehen. Standardmäßig ist die Verwendung eines hochgenauen, ab Werk kalibrierten, IMU Moduls der Firma Analog Devices vorgesehen. Zusätzlich wurde zu Versuchszwecken und zum Einsatz an weniger kritischen Objekten hybrides Tracking zu ermöglichen, eine Low-Cost IMU direkt auf der Leiterplatte integriert. Sollte sich zum Beispiel bei den Integrationstests herausstellen, dass weitere Sensoren benötigt werden, können diese über einen IIC-Bus oder RS485 Schnittstelle an die ITD-IMU angeschlossen werden. Die ITD-IMU dient dann als Sammelknoten und Verbindungselement zum Hybriden Trackingsystem. Auch ist vorgesehen, anstatt passiver optischer Marker zu Erfassung mit dem Trackingsystem auch die Ansteuerung aktiver Marker mit LEDs zu unterstützen.

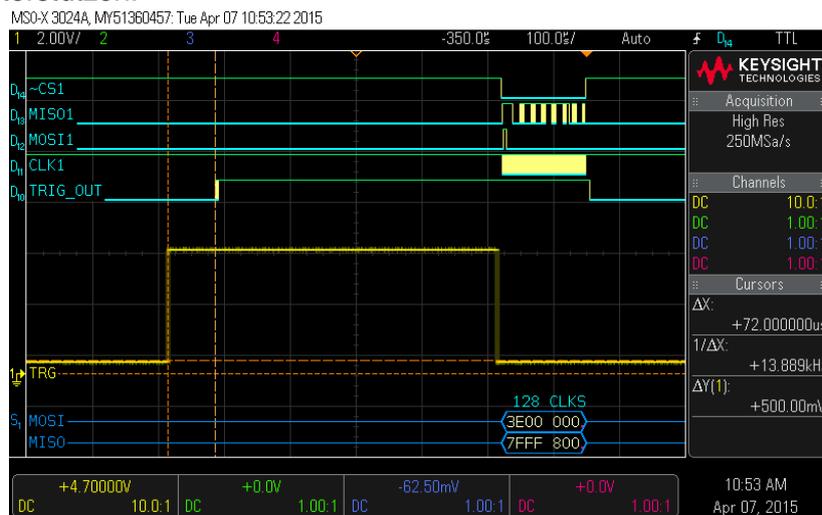


Abbildung 19: Bestimmung der Latenz zwischen Trigger Signal und IMU Datenaufnahme

Da die Latenz des Gesamtsystems einen kritischen Parameter für die Navigation und Regelung des Roboters darstellt, wurden Messungen zur Bestimmung der Latenz vom Zeitpunkt der Triggersignalerzeugung für die ITD-IMU bis zum tatsächlichen Aufnahme- und Bereitstellungszeitpunkt der Messwerte durch das IMU-Modul bestimmt. Hierzu wurden wie in Abbildung 19 dargestellt mit Hilfe eines Oszillogramms die einzelnen Signale physikalisch gemessen und die Latenz bestimmt.

Auch hier wurde, um die Echtzeitfähigkeit des Systems zu garantieren, ein Real-Time-Operating-System (RTOS) eingesetzt. Dies war ebenfalls notwendig um die Datenflüsse der Schnittstellen mit Hilfe von priorisierten Tasks zu synchronisieren.

Aufgebaute Exemplare der Elektronik wurden den Projektpartnern zu Integrationstests und Versuche zur Verfügung gestellt.

Die Erarbeitung und Implementierung des EKF zur Sensordatenfusionierung erfolgte zunächst in einer Testumgebung in Mathworks® Matlab. Hierbei war es notwendig die Testumgebung so zu gestalten, dass die Testdaten möglichst der Realität entsprechen. Hierfür wurde ein Testdatengenerator implementiert welche sämtliche Sensordaten in ihrer zeitlichen Abhängigkeit generieren kann. Außerdem wurde ein Testaufbau zur Datengenerierung mit den vorhandenen Sensoren aufgebaut, welcher den integrierten Bedingungen im Gesamtsystem entspricht. Eine der Herausforderungen war es die Latenz der einzelnen Systeme zu bestimmen. Abbildung 20 zeigt, dass es eine feste Latenz zwischen Optischen Trackingdaten und den inertialen Daten sowie unterschiedliche Datenraten gibt. Die Latenz setzt sich zusammen aus der Zeitspannen von dem physikalischen Ereignis, der Messung durch die Sensoren (IMU und optisches Tracking), Übermittlung der Daten zum Konzentrator und dem Eintreffen dieser Daten beim Konzentrator. Da das physikalische Ereignis selbst nicht messbar ist, ist die Zeitbasis für den EKF die Abtastrate des Sensorsystems mit der höheren Abtastrate und geringeren Latenz zum physikalischen Ereignis. In dem vorliegen Fall ist dies das inertielle System. Da das inertielle System keine absoluten Positions- oder Orientierungsdaten liefert kann diese Information nur mit Hilfe der zugehörigen optischen Trackingdaten bestimmt werden. Dies stellt den sogenannten „Update-Step“ des EKF dar. Zwischen diesen Update-Steps werden zur Kompensation der unterschiedlichen Abtastraten mehrere „predict-Steps“ des EKF als Vorhersage der aktuellen Position und Orientierung durch die inertialen Daten bestimmt.

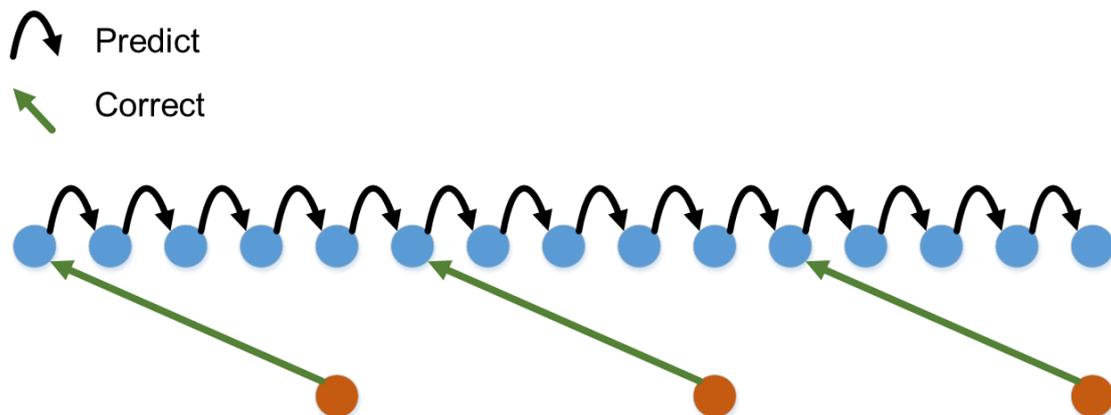


Abbildung 20: Zusammenhang der Latenz und Abtastzeitpunkten der verschiedenen Modalitäten (Synchronisationsproblemdarstellungsabbildung)

Beim Eintreffen eines neuen Update-Zeitpunkts sind bedingt durch die zu kompensierende Latenz bereits mehrere Predict-Steps durchgeführt worden. Da diese auf Basis fehlerbehafteter Schätzwerte erfolgten ist es notwendig diese bereits ausgeführte Predict-Steps auf Basis der neuen Messwerte aus dem optischen Trackingsystem neu zu berechnen (siehe Abbildung 20).

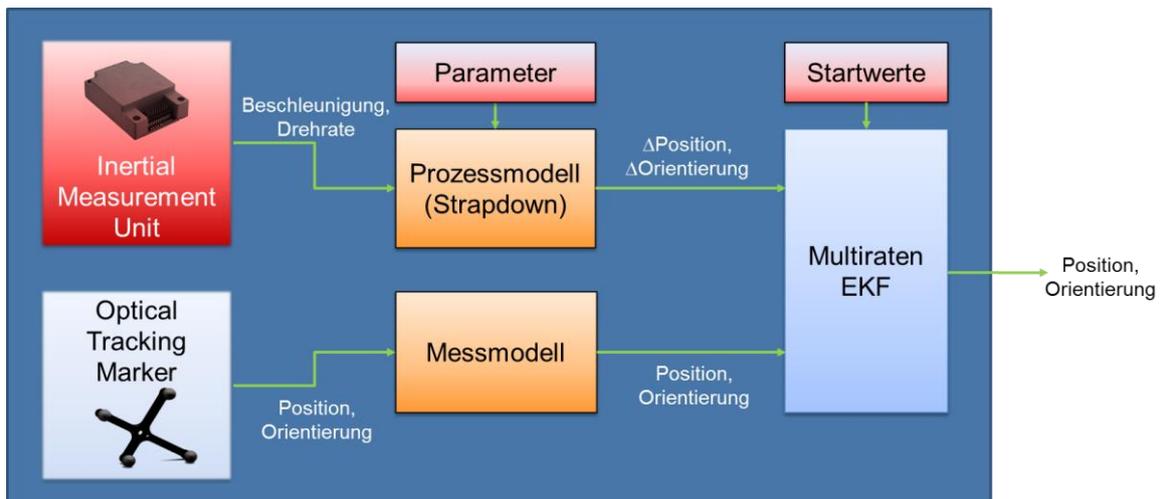


Abbildung 21: Erweitertes Model der Datenfusion mit „Extended Kalman“ Filter

In Abbildung 21 ist die implementierte Datenfusion als Blockdiagramm dargestellt. Das Prozessmodell welches anhand der Messwerte des inertialen Messsystems die Positions- und Orientierungsänderung bestimmt, benötigt neben den Rohdaten weitere Parameter wie z.B. die Kalibrierungsinformationen der Lage des IMU-Moduls relativ zu den optischen Markern. Der EKF muss mit gültigen Zustandsinformationen und Rauschparametern des Mess- und Prozessmodells initialisiert werden.

Nach der Überprüfung durch die generierten Testdaten wurde das Fusionsmodell auf dem Konzentrator implementiert und getestet. Dieser Test wurde mit unserem Referenztrackingsystem durchgeführt. Im Wesentlichen wurden zwei Testaufbauten genutzt, welche eine definierbare Bewegung durchführen können. Dies ist zum einen durch einen Drehtellerversuch, welcher eine gleichförmige Kreisbewegung durchführen kann, zum anderen ein Pendelversuch bei welchem der Ausschwingvorgang gemessen werden kann (siehe Abbildung 22). Der Drehtelleraufbau wurde außerdem zur Ermittlung der Lage des IMU-Moduls relativ zu den optischen Markern (Kalibrierdaten) verwendet.

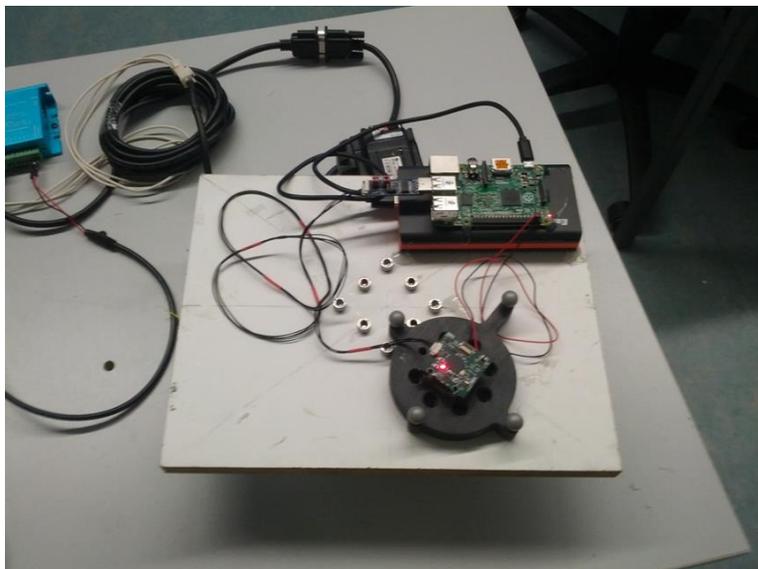


Abbildung 22: Messaufbauten zur Kalibrierung der Inertialen Sensorik

D) Evaluation und Ergebnisse

Im Rahmen des ITD Projektes wurde ein Kameraprototyp aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Da ein Vollbild des hochauflösenden Bildsensors nicht im FPGA gespeichert werden kann und der Transfer in den Arbeitsspeicher zu langsam ist, wurde der Datenstrom in mehrere Ströme aufgeteilt. Abbildung 23 zeigt diese internen Videodatenströme der FPGA-Pipeline, welche während dem Betrieb der Kamera aufgenommen wurden. Die Herausforderung bestand auch hier in der Synchronisierung dieser parallelen Ströme, da jeder dieser Ströme die gesamte Vorverarbeitung mehrfach, wie in Abbildung 14 dargestellt, realisiert. Die Zusammenführung der Ausgaben des FPGAs erfolgt anschließend in der Software des PS.

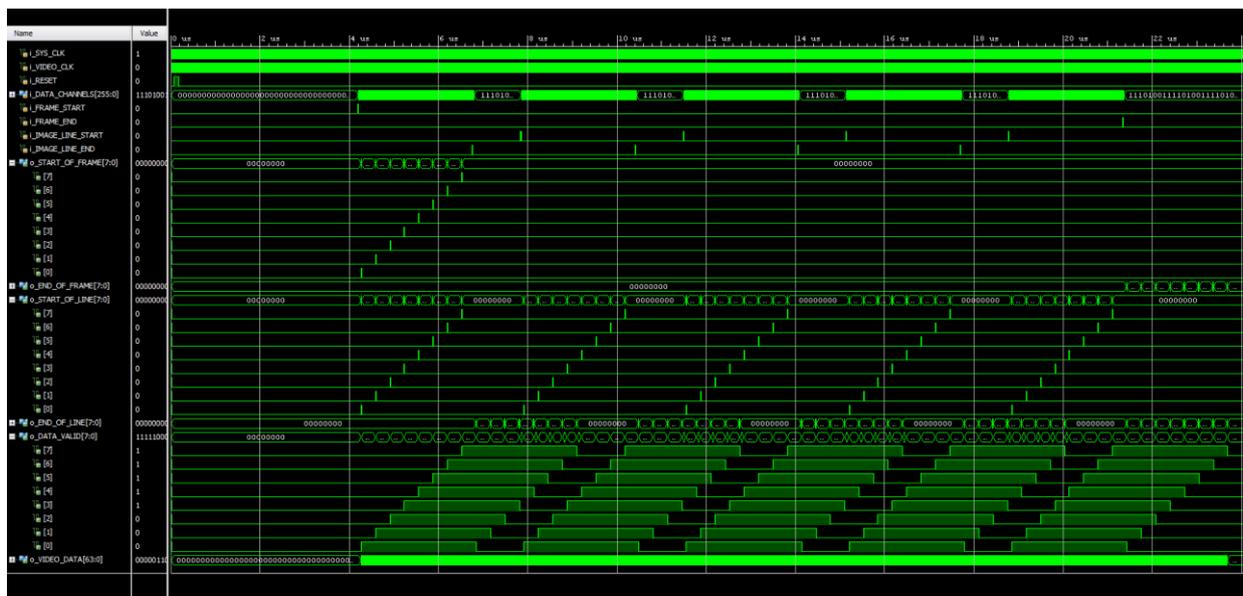


Abbildung 23: Oszillogramm der Internen Videodatenströme des FPGAs

Nach der parallelen Vorverarbeitung der Bilddaten durch den FPGA werden diese durch die nachgeschaltete Software-Bildverarbeitung zu Trackingdaten transformiert. Dies beinhaltet die zusammenhängende Extraktion und Klassifikation von für das Tracking relevante Bildregionen anhand von aus der physikalischen Geometrie abgeleiteten und auf die Bildebene projizierten Marker-Strukturen. Dies wurde erreicht durch ein sogenanntes „Connected Component Labeling“ bei dem die vom FPGA Zeilenbasierten-Vorextraktion durch das Schwellwertverfahren als relevant identifizierten Bildabschnitte, zu zusammenhängenden Bildregionen zusammengefasst werden. Die für das Tracking relevanten Informationen der einzelnen Bildregionen sind deren statistische Eigenschaften, aus welcher sich die genaue Position und Größe der Region beziehen lassen. Nur diese Informationen werden an den Konzentratoren für die endgültige Berechnung der Trackingdaten und Navigationsinformation übertragen. Abbildung 24 zeigt eine Visualisierung der von der Kamera an einem Computer übertragene Regionsinformationen innerhalb einer zu Testzwecken entwickelten Software.

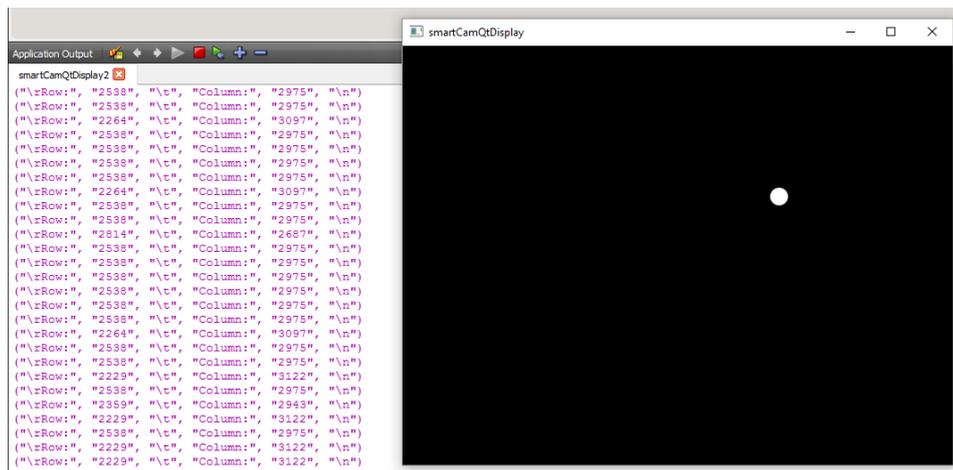


Abbildung 24: Ausgabe der Trackinginformationen aus der Kamera und Visualisierung der extrahierten Bildregion auf einem Computer

Parallel zur Evaluation der Kamera wurden die Algorithmen zur Datenfusion des hybriden Trackings für den Konzentrador implementiert und getestet. Hierbei wurden die Messaufbauten, wie in Abbildung 22 gezeigt, verwendet um zum einen die Kalibration der Lage des IMU-Moduls relativ zu den optischen Markern zu bestimmen, sowie eine die Funktionalität des implementierten Fusionsmodell zu evaluieren. Abbildung 25 zeigen das Verhalten des Datenfusionsmodells bei einer kurzen Unterbrechung der Erfassung durch das optische Tracking sowie ein Totalausfall dessen. Das Prozessmodell (Strap-Down-Navigation) ist auf Basis der inertialen Daten in der Lage über einen kurzen Zeitraum die fehlenden Absolut Informationen des Trackingsystems auszugleichen. Jedoch nimmt der Fehler mit der Länge des Ausfalls exponentiell zu (siehe Abbildung 26). Dies ist zum einen bedingt durch das Rauschen und die Genauigkeit der Sensorsysteme, die Fehlerfortpflanzung durch die mehrfache Integration inertialen Sensordaten und Genauigkeit der Kalibration.

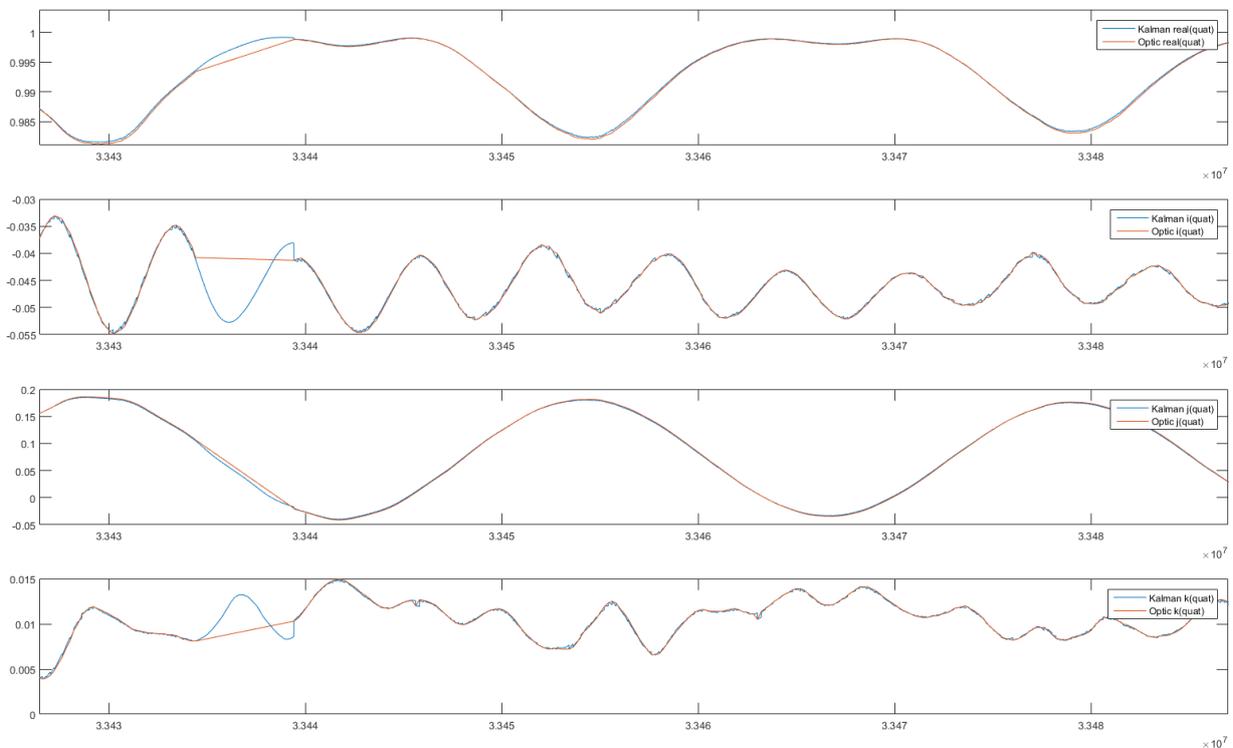


Abbildung 25: EKF Ausgaben bei kurzzeitigen Wegfall der "Update Steps" durch das optische Trackingsystem und des daraus resultierend Drifts der Berechnungsergebnisse

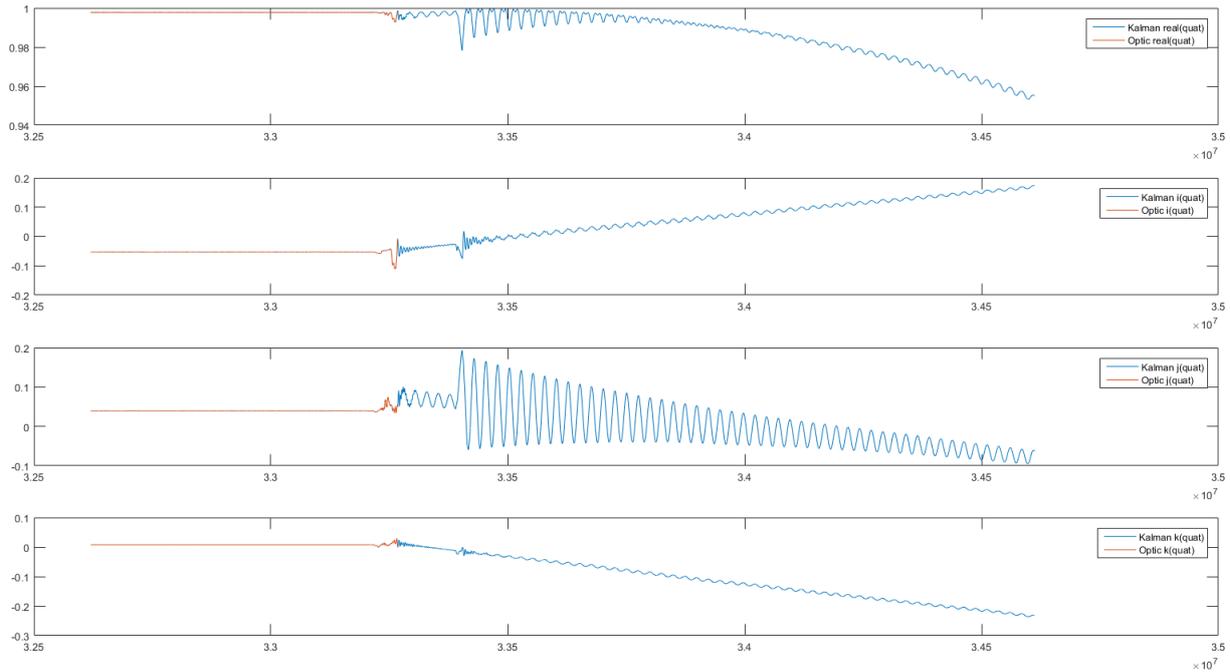


Abbildung 26: EKF Ausgaben bei Wegfall der "Update Steps" durch das optische Trackingsystem und des daraus resultierenden Drifts der Berechnungsergebnisse

Die zuvor gezeigten Ergebnisse der Evaluation der Datenfusion wurden mit Hilfe der ITD-IMU erzeugt, wodurch gleichzeitig auch die Funktionalität des gesamten ITD-IMU Moduls (Synchronisierte Sensordatenerfassung und Übertragung) verifiziert wurde. Abbildung 27 zeigt das Ergebnis der, zuvor mit Hilfe von CAD-Daten geplanten, erfolgreichen Integration des ITD-IMU Moduls in den ITD-Roboter Prototypen.



Abbildung 27: Integration ITD-IMU in Roboter Prototyp

Da in dem Projekt zwei voneinander stark abhängige Systeme von Grund auf neu entwickelt wurden, wurde zum Teil auf rein simulierten Daten die Implementierung und Verifizierung zu durchgeführt. Um jedoch die, wie bereits vorhergehend beschrieben, die Funktionalität der einzelnen Komponenten zu verifizieren wurden in den Aufbauten für die Verifizierung der inertialen Sensorik auf definierte Bewegungen gesetzt. Für das rein optische Trackingsystem ist ein Pendel- oder Drehteller-Aufbau ohne weitere Referenzsystem jedoch weniger geeignet. Als weiteres Referenzsystem wurde das am EMB-Lab vorhandene medizinische Trackingsystem

Polaris der Firma Northern Digital Imaging (NDI) eingesetzt. Auch wenn dieses Trackingsystem nicht die geforderte Genauigkeit und dynamischen Eigenschaften des, mit der geplanten Smartcam, geplanten hybriden Trackingsystem erfüllt, so dient es jedoch in der frühen Phase als Referenzsystem zum entwickelten System. So ist es z.B. möglich die Funktionsweise des Trackingsystems mit dem NDI System zu verifizieren und zu vergleichen. Auch dient es als ergänzende Komponente bis mehrere hochauflösende Kameras für das Multikamerasystem vollständig zur Verfügung stehen.

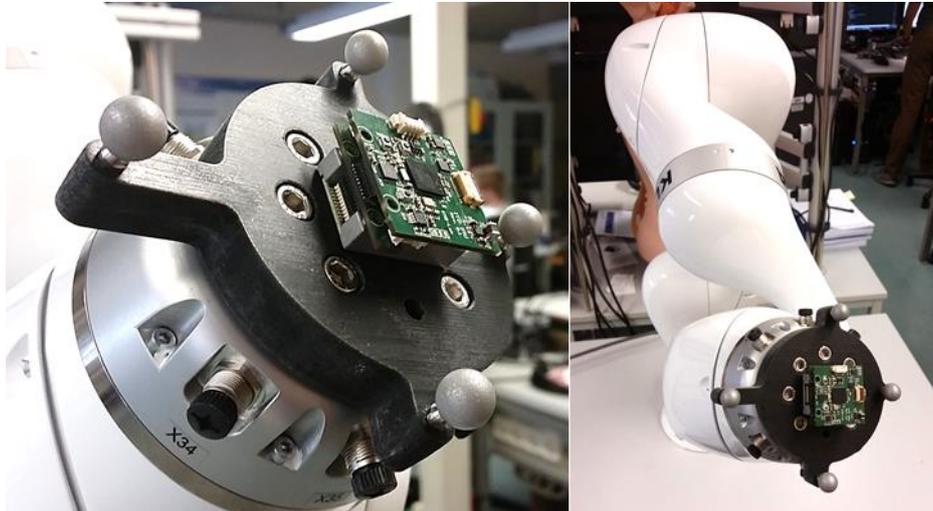


Abbildung 28: Versuchsaufbau mit einem Leichtbauroboter um definierte Bewegungen durchzuführen.

Auch zur Bestimmung der Kalibrierung der Lage des IMU-Moduls relativ zu den optischen Markern wurde neben dem Drehtelleraufbau ein Aufbau mit dem am EMB-Lab vorhandenen Leichtbau-Roboter umgesetzt (siehe Abbildung 28). Mit diesem ist es möglich wiederholbare Verkipnungen und Delta-Rotationen durchzuführen, welche notwendig sind um die Kalibrierung zu bestimmen und zu verifizieren.

Nachdem die Funktionsfähigkeit des hybriden Trackingsystems sowie der Smartcam nachgewiesen werden konnte, ist es nun notwendig das Multi-Kamera System weiter aufzubauen. Hierfür muss die zweite verfügbare Kameraelektronik mit einem Bildsensor bestückt und in das noch zu fertigende Kameragehäuse verbaut werden. Damit entsteht zunächst ein mit dem NDI Polaris vergleichbaren Stereokamerasystem mit jedoch einer, auf Grund der Auflösung des Bildsensors, erwarteten höheren Gesamtgenauigkeit bei vergleichbaren Arbeitsraum. Durch die tiefe Integration die uns durch unser System zur Verfügung steht, ist es möglich die bei Verwendung von kommerziellen Teilkomponenten nicht vollständig ermittelbaren Latenzen zu bestimmen und somit die Gesamtgenauigkeit des hybriden Trackingsystems zu verbessern.

Den Projektpartnern steht die implementierte hybride Tracking Version mit dem bereits im ITD-Roboter integrierten ITD-IMU Modul, Fusionbox und dem NDI Polaris für Integrationstests und Systemtests zur Verfügung.

2) Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises der Hochschule Mannheim – EMB-Lab sind die Personalmittel, die für einen Ingenieur eingesetzt wurden, der experimentelle, elektronische und das Gesamtsystem betreffende Integrationsarbeiten durchführte.

Für den Aufbau der Kameras und Sensoreinheiten und experimentelle Aufbauten sind außerdem Materialkosten entstanden.

3) Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Eigenentwicklung des Hybriden Trackingsystems in allen Komponenten war notwendig da keine kommerziell erhältlichen Systeme die Anforderungen erfüllen. Besonders die Anforderungen an ein latenzarmes System mit Fusionierung der inertialen Sensordaten benötigt eine tiefe Integration von optischen und inertielle Daten in das Trackingsystem.

4) Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Vor Abschluss des Verbundprojekts fand ein vom federführenden KMU organisiertes und moderiertes Design Review Meeting statt, in dem die erreichten Ergebnisse vorgestellt und kritisch diskutiert wurden. Das Design Review Meeting war auch ein erster Schritt zur Bewertung des weiteren Aufwands bis zur Fertigstellung eines klinisch einsetzbaren Systems. Die beteiligten KMU prüfen derzeit, ob und in welcher Ausgestaltung die weitere Produktentwicklung auf Basis der erzielten FuE-Ergebnisse erfolgen kann und soll. Die Verwertung des Gesamtsystems würde dann in Form von den am Projekt beteiligten Industriepartnern produzierten Produkten erfolgen. Beide am Verbund beteiligten KMU weisen die für die Herstellung der Produkte erforderliche Fertigungskompetenz und auch die notwendigen Rahmenbedingungen für das Qualitätsmanagement auf. Für etwaige klinische Zulassungen und die weitere Vermarktung müssten dann Partner gesucht werden.

Eine weitere Verwertung der FuE-Ergebnisse könnte für die im Projekt entwickelten Teilkomponenten des Gesamtsystems erfolgen. Im Falle der Hochschule Mannheim handelt es sich hierbei um die intelligente Kamera (und ihre Teilkomponenten) sowie die Hardware und Software für das hybride Tracking mit inertial-optischen Sensoren. Für diese Teilkomponenten wurden bereits die möglichen Herstellungskosten abgeschätzt. Derzeit wird die nicht sehr übersichtliche Marktsituation (Alleinstellungsmerkmale, Wettbewerb, Marktpreise) geprüft, um ggf. eine erfolgreiche Positionierung vorzubereiten. Entsprechend der Erkenntnisse aus der Marktrecherche müssten die FuE-Ergebnisse dann in Produkte überführt werden. Da wir den Markt nicht ausschließlich im medizinischen Umfeld sehen, ist denkbar, dass eine Verwertung auch auf einer schnelleren Zeitachse (ca. 1-2 Jahre) als der für Medizinprodukte üblichen erfolgen kann. In die Prüfung der Marktaussichten der Teilkomponenten des EMB-Lab sind die beteiligten KMU involviert.

5) Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Vorhabens sind Konzepte bzw. Entwicklungen der Unternehmen Mako, Stryker und Google bekannt geworden, die die im Stand der Technik genannten Nachteile bisheriger Operationsroboter auszuräumen versuchen. Im Falle des Mako-Operationsroboters handelt es sich aber auch nicht um ein echt handgehaltenes System, so dass die Anwendung für den Operateur weiterhin mit sich aus der Sperrigkeit des Systems verbundenen

Komplikationen verbunden ist. Das Konzept von Stryker liegt uns bisher nur in Form einer Patentanmeldung vor. Eine tatsächliche Realisierung des Konzeptes ist uns bisher nicht begegnet. Auch das Konzept von Google kommt unserem Ansatz recht nahe, ist uns bisher aber auch nur in Form einer Patentanmeldung bekannt. Mit welchem Geschäftsmodell Google tatsächlich in die Robotik einsteigen will, ist derzeit noch umstritten. Offensichtlich positioniert sich das Unternehmen in die Nähe von Johnson & Johnson, mit dem es in ein Joint Venture eingetreten ist.

6) Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Patrick Schüle: "Realisierung eines Connected Component Labeling Algorithmus auf einer hybriden Dual Core Cortex-A9 / FPGA Architektur für eine Smart-Camera", Bachelorarbeit, Hochschule Mannheim – EMB-Lab, Mai 2013

Isaac Verdu: "Development of an FPGA-based Platform for Real-Time Acquisition and Processing of Ultra High Definition Video Tracking Data". Master Thesis. Hochschule Mannheim – EMB-Lab, November 2015

Isaac Verdu, Stefan Hohnstein, Marcus Vetter: "Development of an Ultra-High-Definition Camera for Real-Time Multi-View Tracking of a Handheld Surgical Robot". Proceedings of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS), 30th International Congress and Exhibition. 2016 (Pending)

III. Anlage: Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht

Siehe Anlage.

IV. „Kurzfassung“ (Berichtsblatt) des wesentlichen fachlichen Inhalts des Schlussberichts

Siehe Anlage.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht (Einzelbericht Hochschule Mannheim) - zum Verbundprojekt: ITD (Intelligent Tool Drive) – ein handgehaltenes robotisches System für chirurgische Anwendungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Marcus Vetter	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2015
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hochschule Mannheim, emb-lab, Fakultät für Informationstechnik Paul-Wittsack-Straße 10 68163 Mannheim	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 13EZ1205D
	11. Seitenzahl 24
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 28
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Rahmen des FuE-Vorhabens sollte ein handgehaltener Operationsroboter entwickelt werden, d.h. eine intelligente Maschine zur Knochenbearbeitung, die vom Arzt in der Hand gehalten wird. Die Positionierung des Bearbeitungswerkzeugs relativ zum Knochen sollte dabei durch optisches Tracking und weitere Sensorik bestimmt und das Werkzeug automatisch gegenüber äußeren Störungen korrigiert werden. Auf diese Weise sollte es möglich werden, Störungen durch z.B. Zittern des Anwenders oder Bewegung des Knochens auszugleichen. Das Projekt wurde in interdisziplinären Zusammenarbeit mit den Projektpartnern während der FuE-Phase durchgeführt. Die Hochschule Mannheim (EMB-Lab) leistete hier einen Beitrag vor allem durch die Einbringung seiner Expertise im Bereich von Konzeption und Entwicklung von Tracking- und Navigationstechnologien, Algorithmen zur Signalverarbeitung und deren Überführung in eingebettete Systeme. Der Beitrag des EMB-Lab lag in der Erarbeitung eines Gesamtkonzepts eines hybriden Trackingsystems mit geringer Latenz und hoher Genauigkeit und modularen Aufbau sowie seiner enthaltenen Teilkomponenten für den handgehaltenen Roboter. Dies umfasste die Erstellung von Teilkonzepten für die intelligente Kamera zur Vorverarbeitung hochaufgelöster Bilddaten, einer inertial-optischen Sensoreinheit für den handgehaltenen Roboter und Datenfusionsverfahren zur Steigerung der Ausfallsicherheit und die für robotergestützte Anwendung geforderte Dynamik. Für die sich aus diesen Konzepten ergebenden Problemstellungen wurden Lösungen erforscht und entwickelt (<i>siehe II., 1) des Schlussberichts</i>). Im Ergebnis entstand ein System bestehend aus intelligenter Kamera, einem Sensor Modul für den ITD-Roboter und ein auf einem Referenzsystem basierenden Implementierung des hybriden Trackings. Diese wurden hinsichtlich ihrer geforderten Funktion evaluiert.	
19. Schlagwörter ITD, Tracking, Navigation, optisch, inertial, Roboter, handgehalten, dynamisch	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Final Report (Mannheim University of Applied Sciences) ITD (Intelligent Tool Drive) – a handheld robotic system for surgical interventions.	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Marcus Vetter	5. end of project 30.06.2015
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Hochschule Mannheim, emb-lab, Fakultät für Informationstechnik Paul-Wittsack-Straße 10 68163 Mannheim	9. originator's report no.
	10. reference no. 13EZ1205D
	11. no. of pages 24
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 28
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract In the scope of this research and development project a handheld surgical intervention robot was to be developed, distinguished by being an intelligent machine for bone treatment manually held by a surgeon. The positioning of a machine tool relative to the bone was to be guided by an optical tracking system and additional sensors to counteract the influence of external disturbances e.g. tremor of the surgeon or the movement of the patient. The research and development project was carried out in an interdisciplinary cooperation with the project partners. The role of the Mannheim University of Applied Sciences (EMB-Lab) has been in the application of its expertise in the fields of research and development of tracking and navigation technologies, algorithms for signal processing and their implementation in embedded systems including hardware and software design. The EMB-Lab contributed to this project with the development of a general system concept of a hybrid tracking system with low latency, high accuracy and modular setup for the ITD robot. This includes the development of hard- and software subsystem concepts for each part and algorithms for an intelligent camera (smart-cam) for the preprocessing of the high-resolution video stream, an inertial-optical sensor unit for the handheld robot and the data fusion to improve the robustness and the dynamic performance of the tracking system as required by a robotic surgery system. For all challenges posed by these concepts, solutions have been researched and implemented (<i>see final report chapter II, subsection 1</i>)). As a final result, a navigation system consisting of an intelligent camera, a sensor module for the ITD-Robot and a reference system based solution for hybrid tracking have been implemented and evaluated.	
19. keywords ITD, tracking, navigation, optical, inertial, robot, handheld, dynamic	
20. publisher	21. price