

Konzept und Anwendungen eines mobilen Roboter-Systems in der Indoor-Navigation und -Raumdatenerfassung

PENG CHENG¹, EBERHARD GÜLCH¹ & PAUL RAWIEL¹

Zusammenfassung: Die Robotik wird nicht nur in der industriellen Produktion, sondern auch in der Dienstleistung verstärkt eingesetzt. Dem wollen wir mit einer Forschungsroboterplattform für eine hochaktuelle, innovative Hochschulausbildung Rechnung tragen. Studierende der Studiengänge Vermessung, Informationslogistik und Mathematik sollen das Equipment nutzen, um ihre Projekt- und Abschlussarbeiten in den Bereichen Erfassung von Innenraum-Geometrien, Bildverarbeitung, Mesh-Generierung, Objekterkennung, Kollisionserkennung, Bruchkantenerfassung und Kommunikation zwischen mobilen Robotern anfertigen zu können. Als Sensorik kommen optische Sensoren, Entfernungskameras, aktive Sensoren wie Streifenprojektion oder weitere Sensoren für die Navigation zum Einsatz.

Dieser Beitrag stellt das Konzept und die Anwendungen des mobilen Roboter-Systems vor. Zunächst werden die Roboterplattform und dann die intern bereits vorhandene Sensorik beschrieben. Die Roboterplattform bietet die Möglichkeit, verschiedene Sensoren an verschiedenen Positionen und in verschiedenen Höhen an den zentralen Rechner anzuschließen und über WLAN auch extern abzurufen, bzw. zu steuern.

Die vorhandene Sensorik umfasst eine Logitech RGB Kamera zur Live Aufnahme und Linienverfolgung, neun Infrarotabstandssensoren zur Wandverfolgung, einem Kollisionsschutzsensor für verschiedene Sicherheitsaspekte, einem analogen Induktiven Näherungsschalter zum Erkennen von metallischen Objekten, und einem digitalen optischen Sensor zur optischen Erkennung eines markierten, erlaubten Operationsbereichs.

Der HFT-Robotino ist aktuell mit vier weiteren Sensoren ausgestattet, die weitergehende Möglichkeiten zur Raumdatenerfassung und Navigation bieten. Hierbei handelt es sich um ein XSENS Sensor, eine Bumblebee Dreifach Kamerasystem, eine PrimeSense Carmine Entfernungskamera und eine Microsoft Kinect V2. Die Software RobotinoView ist eine von FESTO entwickelte Programmierumgebung für Robotino. Mit den vorhandenen Funktionsblöcken in RobotinoView können Steuerungsprogramme für Robotino relativ leicht erstellt und ausgeführt werden. Damit aber auch die externen Sensoren flexibel angesprochen und eingesetzt werden können ist die Anwendung der Robotino API2 unumgänglich. Mit dieser open-source Entwicklungsumgebung können auch viel anspruchsvollere Messaufgaben programmiert werden, insbesondere in Verbindung mit weiteren Softwarepaketen der Sensoren, bzw. zusätzlich als Open-Source (z.B. RTAB-MAP) verfügbar.

In ersten Experimenten wurde mit einer 3D-Modellierung mit Prime Sense und RTAB-MAP begonnen. Zum einen zur 3D-Raumdatenerfassung, zum anderen für die 3D-Modellierung von Personen. Beispiele hierzu werden im Detail dargestellt. Mit einer weitergehenden Untersuchung wurde die Verfolgung von Personenbewegungen mit PrimeSense und dem Open-Source Programm NiTE2 in einer ersten Stufe realisiert. Ebenso wurde eine Gesten- und Sprachsteuerung mit einer Microsoft Kinect 2.0 Entfernungskamera für Robotino entwickelt.

¹ Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart;
E-Mail: [peng.cheng, eberhard.guelch, paul.rawiel]@hft-stuttgart.de

1 Einleitung

Die Robotik breitet sich nicht nur in der industriellen Produktion, sondern auch in der Dienstleistung verstärkt aus. Dem wollen wir mit einer Forschungsroboterplattform für eine hochaktuelle, innovative Hochschulausbildung Rechnung tragen. Studierende der Studiengänge Vermessung, Informationslogistik und Mathematik sollen das Equipment nutzen, um ihre Projekt- und Abschlussarbeiten in den Bereichen Erfassung von Innenraum-Geometrien, Bildverarbeitung, Mesh-Generierung, Objekterkennung, Kollisionserkennung, Bruchkantenerfassung und Kommunikation zwischen mobilen Robotern anfertigen zu können. Als Sensorik kommen optische Sensoren, Entfernungskameras, aktive Sensoren wie Streifenprojektion oder weitere Sensoren für die Navigation zum Einsatz.

2 HFT-Robotino

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Paul Rawiel, Prof. Dr. Uwe Müssigmann und Prof. Dr. Nicola Wolpert wurden im Rahmen der Strategischen Ziele der HFT Stuttgart zwei mobile Forschungsroboter Robotino (Abb. 1) der Firma Festo beschafft, die mit einer Vielzahl von Sensoren zur Erfassung von Rauminformation ausgestattet sind.



Abb. 1: Festo Robotino Premium (Quelle: PENSKY 2013)

Das Ziel dieses strategischen Projektes ist es, die Funktion der einzelnen Komponenten eines mobilen Robotersystems detailliert zu untersuchen, Hard- und Software der Robotik-Plattform zu integrieren und mögliche Anwendungen des Robotersystems in der Hinsicht von Indoor-Navigation und photogrammetrischer Vermessung zu beschreiben und realisieren.

Robotino besitzt einen omnidirektionalen Antrieb, der aus drei Baueinheiten (Abb. 2) besteht. Durch dieses spezielle Antriebssystem ist Robotino in der Lage, jederzeit in eine beliebige Richtung zu fahren und sich zu drehen. Drei Motoren in den Baueinheiten ermöglichen eine Fahrtgeschwindigkeit bis zu 10 km/h.

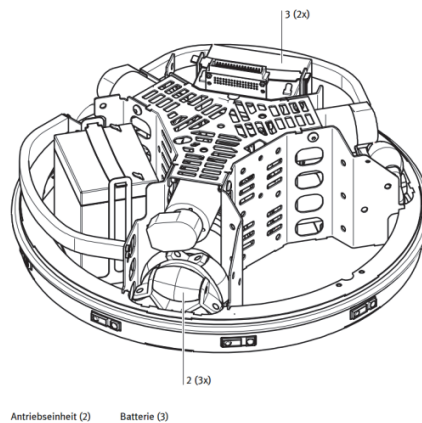


Abb. 2: Position der Antriebseinheiten und Batterie auf dem Robotino-Chassis (Quelle: SCHWARZENBERGER & WEBER 2007)

Wir unterscheiden hier Interne/Mitgelieferte Sensoren und die Erweiterungen durch Sensoren der Raumdatenerfassung im Rahmen des Projekts.

3 Interne/mitgelieferte Sensoren

3.1 Logitech-Kamera

Die Robotino-Kamera ist an der Montagesäule befestigt und über USB-Schnittstelle mit Robotino verbunden. Die Kamera ist in Höhe und Neigung verstellbar. Sie liefert ein LIVE-Bild im .MJPG Format in einer Auflösung von 160x120, 320x240, 640x480 oder 800x600 Pixel. Mit der Software Robotino-View von Festo ist es möglich, Live-Bilder aufzunehmen und die Bilder zu verarbeiten. Eine praktische Anwendung hierbei ist Linienverfolgung. Links in Abb. 3 werden Live-Bilder von Boden angezeigt, worauf ein schwarzer Klebestreifen geklebt ist. Rechts in der Abb. 3 ist die Bildinformation nach der Verarbeitung zu sehen. Die schwarzen Linien im originalen Bild werden jetzt als weiße Segmente dargestellt. Andere Bereiche werden in schwarz dargestellt. Der Schwellwert im Linienkenner-Fenster kann von 1 bis 255 eingestellt werden. Je größer dieser Wert beträgt, desto stärker wird das Bildrauschen unterdrückt. Die Option „Beginn der Suche“ gibt an, von welcher Pixelzeile die Suche beginnen soll. Darüber hinaus ist die Anzahl der zu suchenden Pixelzeilen durch die Option „Suchhöhe“ definiert.

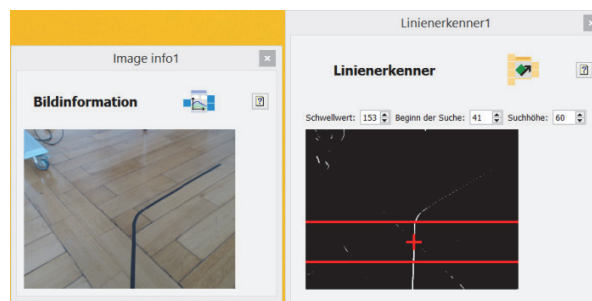


Abb. 3: Live-Bilder und Linienkenner im Robotino-View (Quelle: CHENG 2014).

3.2 Infrarot-Abstandssensoren

Robotino hat neun Infrarot-Abstandssensoren für die Messung des Abstandes von Objekten im Chassis integriert. Die Sensoren sind in einem Winkel von 40° zueinander untergebracht und ermöglichen relative Abstandsmessungen eines Objektes zwischen 4 und 30 cm (SCHWARZENBERGER & WEBER 2007). Durch die Sensoren kann Hindernissen ausgewichen, Abstand gehalten oder ein Ziel angesteuert werden. Eine interessante Anwendung der Infrarot-Abstandssensoren ist die Wandverfolgung, d.h. Robotino fährt automatisch entlang der Wand und hält stets einen gewissen Abstand zur Wand.

3.3 Kollisionsschutzsensor(Stoßleiste)

Als Kollisionsschutzsensor ist eine Schaltleiste um das gesamte Chassis angebracht. In seinem Kunststoff-Profil befinden sich zwei voneinander getrennte leitfähige Bereiche. Diese werden bei geringem Druck auf das Kunststoff-Profil kurzgeschlossen. Dadurch kann eine mögliche Kollision mit einem Objekt vermieden werden.

3.4 Induktiver Näherungsschalter

Ein analoger induktiver Näherungsschalter dient zur Erkennung metallischer Objekte auf dem Untergrund. Der Erfassungsbereich des Sensors beträgt 0-6 mm (SCHWARZENBERGER & WEBER 2007).

3.5 Digitaler Optischer Sensor

Der digitale optische Sensor besteht aus einem Lichtleitergerät und einem flexiblen Lichtleiter. Das Lichtleitergerät arbeitet mit sichtbarem Rotlicht und kann das reflektierte Licht nachweisen. Je nach Reflexionsgrad unterschiedlicher Bodenoberflächen entsteht ein boolesches Signal 0 oder 1 (in der Programmiersprache false oder true) (CHENG 2014). Damit kann der Roboter an mit Klebeband markierten Positionen gestoppt werden.

4 Externe Sensoren – Das HFT Robotino System

Der Robotino im LIMES-Labor an der HFT ist eine Festo Robotino Premium Edition. Für die Arbeit werden ein Trägheitsnavigationssystem XSENS-MTi-G-700, eine Stereokamera Point Grey Bumblebee XB3, eine RGB-D-Kamera PrimeSense Carmine 1.08 und die Kinect-V2-Kamera von Microsoft auf der Montagesäule befestigt (Abb. 4).

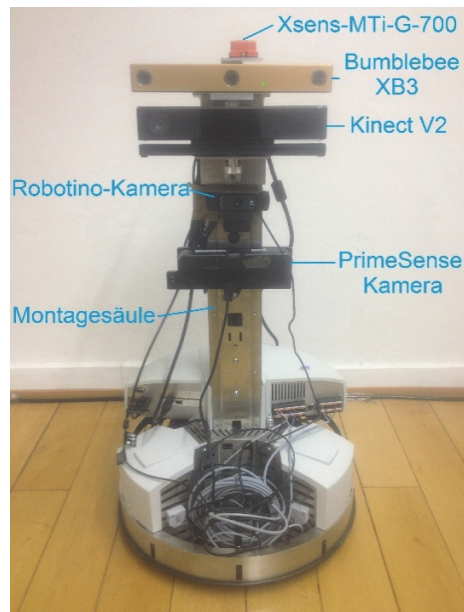


Abb. 4: Das HFT Robotino System – Stand Oktober 2014 (Quelle: CHENG 2014).

4.1 Inertial Sensor Xsens MTi-G-700

Der Sensor Mit-G-700 (s. Abb. 5) ist ein Trägheitsnavigationssystem, ausgestattet mit einem Inertial-Messsystem. Es dient für die präzise Ortsbestimmung und Positionierung. Der Sensor ist über eine USB-Schnittstelle mit Robotino verbunden.

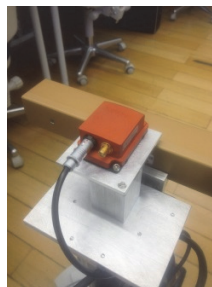


Abb. 5: Xsens MTi-G-700 auf HFT Robotino (Quelle: <http://www.xsens.com/products/mti-g-700/>, CHENG 2014).

4.2 Stereokamera Point Grey Bumblebee XB3(BBX3-13S2C-38)

Point Grey Bumblebee XB3 (Abb. 6) ist eine Multisensor-Stereokamera mit hoher Flexibilität und Genauigkeit. Die Kamera hat drei 1.3 Megapixel-Sensoren und zwei Basislinien zur Stereobildverarbeitung. Darüber hinaus verwendet die Kamera einen IEEE-1394b-Bus für die serielle Datenübertragung.



Abb. 6: Point Grey Bumblebee XB3 (Quelle: <http://ww2.ptgrey.com/stereo-vision/bumblebee-xb3>)

4.3 PrimeSense Carmine Kamera (DPI-7-Scanner)

Die PrimeSense Carmine Kamera ist ein Bestandteil des DPI-7-Scanners der Firma DotProduct LLC. Die Kamera (Abb. 7) besteht aus einem Infrarot-Projektor auf der linken Seite, einer RGB-Kamera in der Mitte und einem sog. Active Pixel Sensor auf der rechten Seite.



Abb. 7: PrimeSense Carmine Kamera (Quelle: <http://www.geekwire.com>)

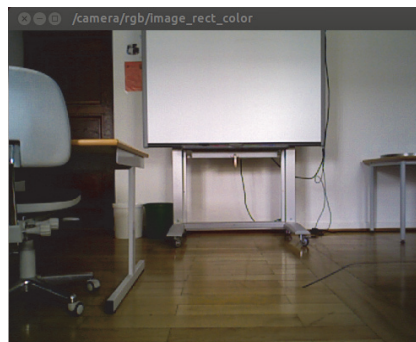


Abb. 8: Farbbild von PrimeSense Carmine (Quelle: CHENG 2014)

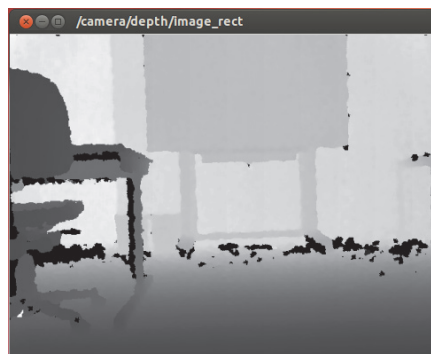


Abb. 9: Tiefenbild von PrimeSense Carmine (Quelle: CHENG 2014)

Der Treiber OpenNI2 (OPENNI2, 2014) ermöglicht es, ein Farbbild (Abb. 8) und ein Tiefenbild (Abb. 9) aufzunehmen. Mit den Farbinformationen aus dem Farbbild und Entfernungsinformationen aus dem Tiefenbild ist die Kamera in der Lage, die Umgebung in 3D zu rekonstruieren.

4.4 Kinect für Windows V2

Die Kinect für Windows V2 (Abb. 10) der Firma Microsoft, besteht aus einer RGB-Kamera, einem Infrarotsensor und einem Mikrophon. Dieser Sensor ist zur Entwicklung von gesten- und sprachsteuerungsfähigen Windows-Apps bzw. Windows-Desktop-Anwendungen bestimmt.



Abb. 10: Kinect für Windows V2 (Quelle: www.microsoft.com)

Mit der Kinect V2 können Infrarot-, Tiefen- und Farbbilder aufgenommen werden (Abb. 11), die als Grundlage für weitere Auswertungen und Anwendungen dienen.



Abb. 11: Infrarot-, Tiefen- und Farbbild von Kinect V2 (Quelle: www.microsoft.com)

5 Software zur Steuerung des Roboters und der Sensorik

5.1 RobotinoView

Die Software RobotinoView (Abb. 12) ist eine von FESTO entwickelte Programmierumgebung für Robotino. Mit den vorhandenen Funktionsblöcken in RobotinoView können Steuerungsprogramme für Robotino relativ leicht erstellt und ausgeführt werden (FESTO, 2010).

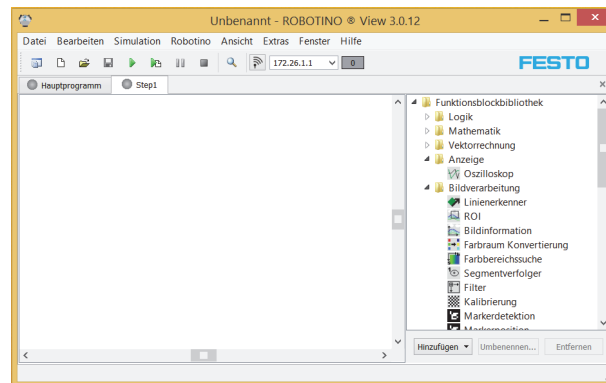


Abb. 12: Screenshot von RobotinoView

Mit RobotinoView ist es möglich, alle oben beschriebenen internen Sensoren zu integrieren. Der Roboter lässt sich z.B. durch RobotinoView-Programme auf einer definierten Strecke fahren, Wand und Linien verfolgen, bei schwarzer Markierung auf dem Boden stoppen (Abb. 13) und eine mögliche Kollision vermeiden.

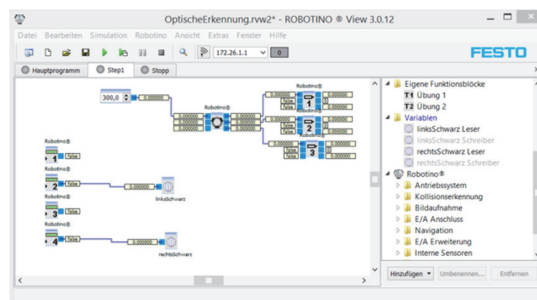


Abb. 13: Beispielprogramm zum Detektieren eines schwarzen Isolierbands auf dem Boden mit optischen Sensoren (Quelle: CHENG 2014).

Wenn man noch externe Sensoren wie Xsens MTi-G-700 und Point Grey Bumblebee XB3 auf den Roboter aufbauen möchte, bietet RobotinoView nur geringe Erweiterungsmöglichkeit.

5.2 Robotino API2

Robotino API2 ist eine open-source Software-Schnittstelle für Robotino. Robotino API2 bietet umfangreiche Funktionsklassen wie z.B.:

- `rec::robotino::api2::Bumper`
- `rec::robotino::api2::Camera`

- rec::robotino::api2::Com
- rec::robotino::api2::OmniDrive

zur Steuerung von Robotino. Ein Beispiel hierzu ist in Abb. 14 zu sehen.

```

robotino@robotino: ~/build/connect
#define _USE_MATH_DEFINES
#include <cmath>
#include <iostream>
#include <stdlib.h>
#include "rec/robotino/api2/all.h"

using namespace rec::robotino::api2;

float _rect[2] = {1, 1};
bool _run = true;

class MyCom : public Com
{
    public: MyCom() : Com("connection")
    {
    }

    void errorEvent(const char * errorString)
    {
        std::cerr<<"Error: "<<errorString<<std::endl;
    }

    void connectedEvent ()
    {
        std::cout<<"connected."<<std::endl;
    }
}
    
```

Abb. 14: Beispielprogramm zur WLAN-Verbindung mit Robotino unter Benutzung von Robotino API2 (Ausschnitt)

5.3 Xsens MTi SDK

Zur Nutzung von Xsens-MTi-G-700 wird die Software Schnittstelle Xsens MTi SDK eingesetzt (MTI, 2014). Damit lassen sich z.B. die Winkelgeschwindigkeiten bei Bewegung des Roboters registrieren. Bei einer Rotation von Robotino bleiben die Winkelgeschwindigkeiten um die X- und Y-Achsen (Abb. 13) relativ stabil, wobei die Winkelgeschwindigkeit um die Z-Achse in den Bereich von $0,35 \times 360^\circ/s$ bis $0,5 \times 360^\circ/s$ schwingt.

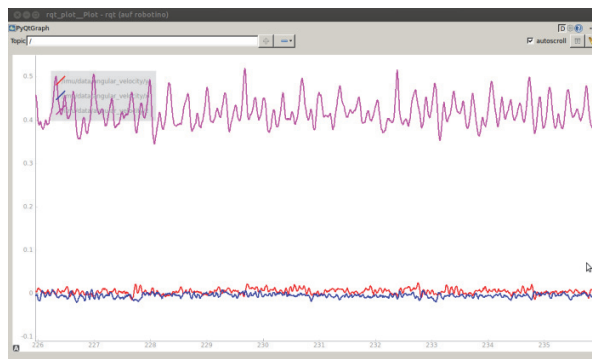


Abb. 15: Winkelgeschwindigkeiten bei Rotation um die Z-Achse. Oben: Z, unten X und Y (CHENG, 2014)

5.4 Point Grey FlyCapture SDK und Triclops

FlyCapture SDK ermöglicht Bildaufnahmen in Echtzeit. Mit dem Softwarepaket „Triclops“ können Stereobilder aufgenommen werden. Diese können korrigiert und z.B. für eine Kantenextraktion (s. Abb. 16) zur weiteren Bildanalyse genutzt werden.



Abb. 16: Bumblebee Auswertungen. Oben: li und re RGB Aufnahmen, unten: korrigiertes Graubild und extrahierte Kanten (Quelle: CHENG 2014)

5.5 3D-Modellierung mit Prime Sense und RTAB-MAP

Für unsere ersten Experimente zur Raumdaten und Personenerfassung mit PrimeSense wird das open-source Softwarepaket „RTAB-MAP“ verwendet (Labbe & Michaud, 2013, RTAB-MAP, 2014). Dabei handelt es sich um eine wichtige Aufgabe „loop closure detection“, d.h. das Software-Paket kann eine Szene erkennen, die schon zu einem früheren Zeitpunkt aufgenommen ist. Die aktuelle Szene wird dann mit der früheren Szene referenziert.

In einem ersten Experiment wird das LIMES-Labor für 3D-Raum-Rekonstruktion benutzt. Dabei dreht sich Robotino um ca. 360°. Die Screenshots von drei verschiedenen Szenen sind in der Abb. 17 bis Abb. 19 dargestellt. In den Abbildungen steht die aktuelle Aufnahme oben links und eine frühere Aufnahme unten links. Auf der rechten Seite ist das bisher rekonstruierte 3D-Modell zu sehen.

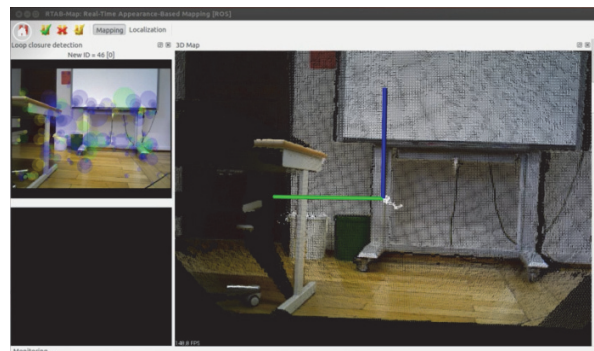


Abb. 17: Raumrekonstruktion mit PrimeSense/RTAB-MAP – Szene 1 (Quelle: CHENG 2014)

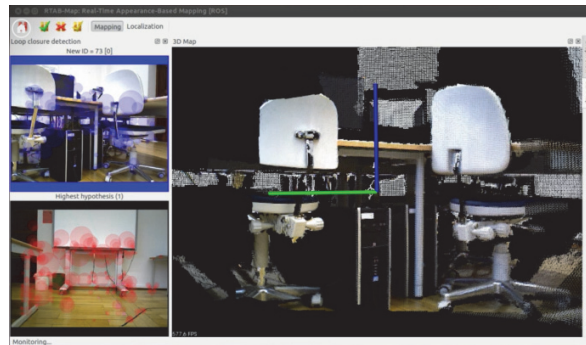


Abb. 18: Raumrekonstruktion mit PrimeSense/RTAB-MAP – Szene 2 (Quelle: CHENG 2014)

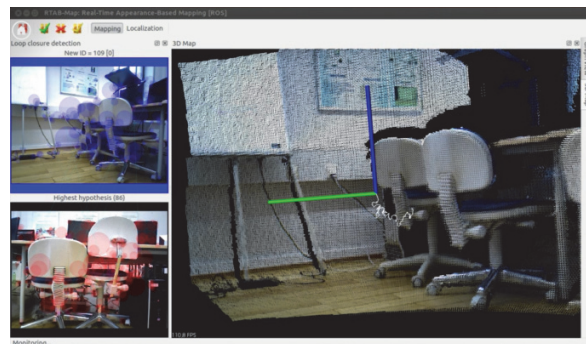


Abb. 19: Raumrekonstruktion mit PrimeSense/RTAB-MAP – Szene 3 (Quelle: CHENG 2014)

In einem zweiten Experiment wird eine Person in 3D modelliert. Dazu fährt Robotino um die Person. Die Auswertung (s. Abb. 20) erfolgt analog dem ersten Experiment zur Raumdatenerfassung.

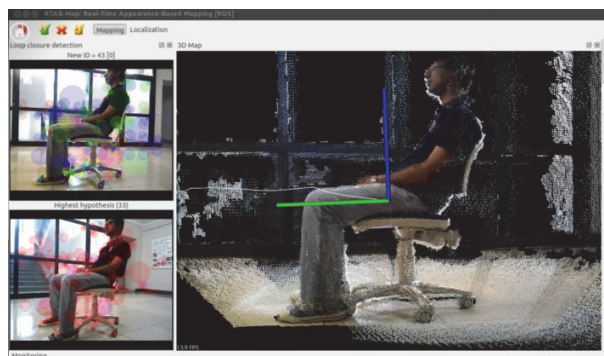


Abb. 20: Personenmodellierung mit PrimeSense/RTAB-MAP – Szene 2 (Quelle: CHENG 2014)

5.6 Tracking von Personen Bewegungen mit Prime Sense und NiTE2

Eine weitere Anwendung der PrimeSense Carmine Kamera ist Personen-Tracker. Mit der Software NiTE2 (OpenNI2, 2014) kann die Kamera Menschen sowie ihre Bewegungen detektieren (s. Abb. 21) und verfolgen.

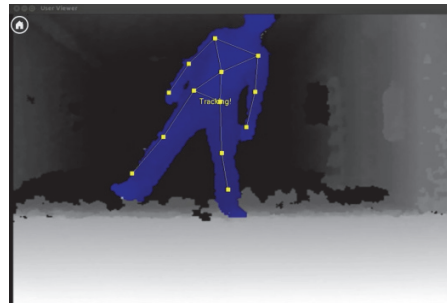


Abb. 21: Tracking von Personenbewegungen mit PrimeSense und NiTE2 – Szene 2 (Quelle: CHENG 2014)

5.7 Gesten- und Sprachsteuerung mit Kinect für Windows V2

Das Softwareentwicklungspaket „Kinect for Windows SDK 2.0“ bietet die Möglichkeit, gesten- und sprachsteuerungsfähige Programme zu entwickeln. Im Robotino-Projekt wurden zunächst zwei Programme zur Steuerung von Robotino entwickelt, implementiert und getestet.

Die Programme verbinden die Software-Schnittstellen von Kinect und Robotino (Abb. 22). Dadurch kann der Nutzer mit seinen Gesten und sprachlichen Befehlen in Verbindung mit dem Kinect-Sensor die Fahrt von Robotino steuern (Abb. 23 und Abb. 24).

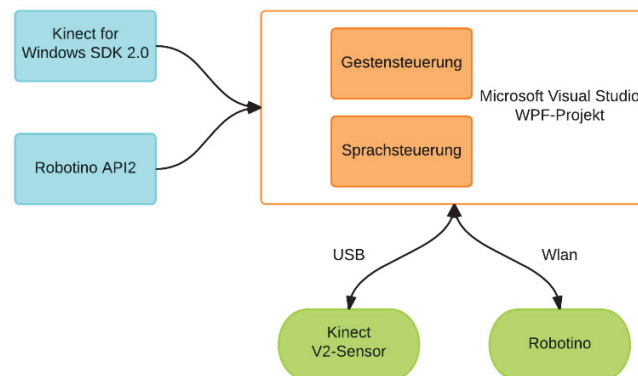


Abb. 22: Konzept der Gesten- und Sprachsteuerung (Quelle: CHENG 2014)

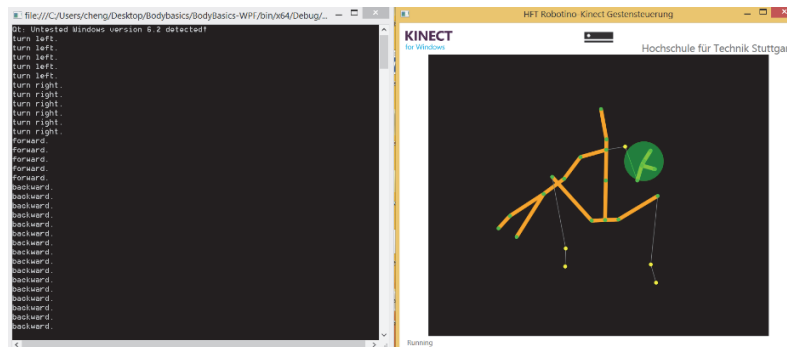


Abb. 23: Gestensteuerung von Robotino mit Kinect V2 (Quelle: CHENG 2014)

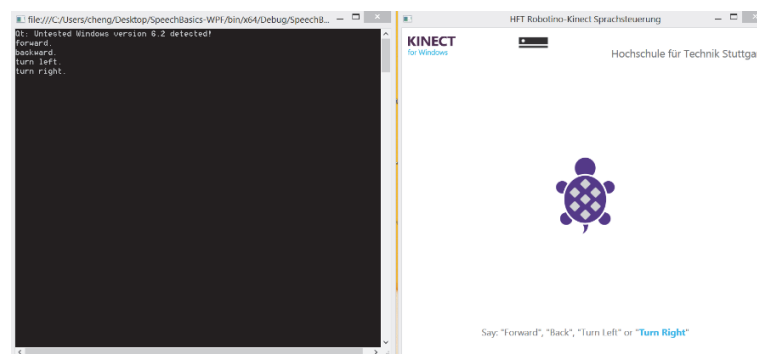


Abb. 24: Sprachsteuerung von Robotino mit Kinect V2 (Quelle: CHENG 2014)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Roboterplattform Robotino bietet eine ausgezeichnete Grundlage für die Kompetenzgewinnung in Sensortechnik, Sensorintegration und mobiler Navigation und Raumdatenerfassung in Innenräumen. Die sehr dynamischen Sensorentwicklungen werden hier mit neuen Techniken der Mehrbildverarbeitung und Bildanalyse verbunden.

Mit diesem Projekt wird eine neue strategische Ausrichtung verfolgt, so dass sich Studierende und Mitarbeiter mit diesen neuen Herausforderungen auseinandersetzen können und auch neue Forschungsprojekte auf diesem Gebiet angestoßen werden können.

Danksagung

Das Projekt „Indoor Navigation“ wird im Rahmen der Strategischen Ziele durch die HFT Stuttgart gefördert und ist ein Gemeinschaftsprojekt mit Kollegen Prof. Dr. Wolpert und Prof. Dr. Müssigmann, Fachgruppe Mathematik der HFT Stuttgart. Dank für die ersten Vorarbeiten gebührt Herrn BSc. Simon Freund und Herrn MSc. Detlev Wagner, die die Integration der Sensorik begonnen hatten und Herrn Gerhard Oesterle, der unkonventionelle aber sehr praktische Lösungen zur Befestigung der Sensoren auf den Plattformen erdacht, konstruiert und umgesetzt hat.

7 Literatur

- CHENG, P., 2014: Konzept und Anwendungen eines mobilen Roboter-Systems in der Indoor-Navigation und photogrammetrischer Vermessung. Interner Bericht, HFT-Stuttgart.
- FESTO, 2014: ROBOTINOVIEW2, Festo Didactic GmbH & Co. KG, Denkendorf, Germany, April 2010.
- LABBE, M. & MICHAUD, F., 2013. Appearance-Based Loop Closure Detection for Online Large-Scale and Long-Term Operation. IEEE Transactions on Robotics **29** (3), S. 734-745.
- MTI, 2014: MTi User Manual, http://amtechs.co.jp/2_gps/pdf/MTi%20User%20Manual.pdf
- OPENNI2, 2014: NITE2. <http://structure.io/openni>
- PENSKY, D., 2013: FESTO Robotino. Interne Präsentation HFT Stuttgart.
- RTAB-MAP, 2014: Real Time Appearance-Based Mapping. <https://code.google.com/p/rtabmap>
- SCHWARZENBERGER, D. & WEBER, R. C., 2007: FESTO Robotino Handbuch, Festo Didactic GmbH & Co. KG, Denkendorf, Germany, März 2007, http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/544305_robotino_deen.pdf