Sachbericht / Schlussbericht

Sensorbasierte logistische Aktivitätserkennung von (Euro-)Paletten - Pal2Rec

Verbundkoordinator:
Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund,
Förderkennzeichen: 19F1174A (alt) | 01F1174A (neu)

Projektpartner:
Technische Universität Dortmund: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW), Dortmund,
Förderkennzeichen: 19F1174B | 01F1174B (neu)

Projektlaufzeit: 02/2024 – 10/2024

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Aufgabenstellung 1
1.2 Voraussetzungen des Vorhabens 2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 3
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 3

2 Eingehende Darstellung **5**
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 5
2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 5
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . 6
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans 6
2.5 Während der Laufzeit bekannt gewordene Fortschritte seitens Dritten 6
2.6 Veröffentlichungen 7
2.7 Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen 7
2.7.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse 9
2.7.2 Erreichte Nebenergebnisse 12
2.7.3 Gesammelte wesentliche Erfahrungen 12

Literaturverzeichnis **16**

1 Einleitung

In modernen Logistikketten spielen Paletten eine zentrale Rolle als standardisierte Ladehilfsmittel. Bisher wurden sie jedoch überwiegend als passive Transportträger genutzt, ohne aktiv zur Datenerfassung oder Prozessoptimierung beizutragen. Im Projekt Pal2rec sollte deshalb geprüft werden, inwieweit anhand von Sensordaten die jeweiligen logistischen Prozesschritte reproduzierbar erkannt werden können.

1.1 Aufgabenstellung

In der Logistik werden verschiedene Sensoren zum Tracking und Tracing von Waren eingesetzt, indem diese mit der Ware selbst oder mit dem dazugehörigen Ladungsträger (bspw. einer Palette) gekoppelt werden. Solche Sensoren werden bspw. für die Lokalisierung der Ware oder zur Überwachung von Schwellwerten (bspw. Stöße) verwendet. Obwohl der punktuelle Einsatz von solchen Sensoren gängig ist, bestand keine Möglichkeit tiefgreifende Informationen aus den Sensordaten zu ziehen und sie bspw. für Prozessanalysen einzusetzen. Der Grund dafür ist, dass die Sensordaten nicht autark auf logistische Prozesse zurückgeführt werden konnten. Ein Zeitstempel allein ist nicht ausreichend, um die Daten mit den logistischen Prozessen zu verknüpfen, sofern keine zeitgenaue Aufschlüsselung der Prozesse vorliegt. Daraus resuliert eine Datengrundlage, die aber nicht mit den Geschehnissen der Realität in Bezug gesetzt werden konnte. Durch diese mangelnde Zuordnung ging der Transport häufig mit einem lückenbehafteten Informationsfluss einher. Eine solche Zuordnung von Sensordaten und logistischen Aktivitäten musste - wenn überhaupt durchgeführt - durch Begleitinformationen wie Kamerabilder erfolgen. Dieser Prozess ist einerseits mit einem beträchtlichen Mehraufwand verbunden und andererseits treten rechtliche Hürden durch die Aufnahme personenbezogener Daten (Kamerabilder) auf. Ohne diese Zuordnung von Sensordaten und Prozessen waren die Daten für die Interpretation und Analyse von Aktivitäten in Prozessketten nicht nutzbar. Es bestand somit der Bedarf, die Daten ohne Begleitinformationen interpretierbar zu machen.

Projektziel und Herangehensweise: Das Hauptziel war der Nachweis, dass logistische Prozesse durch die Auswertung und Interpretation von Sensordaten reproduzierbar zu erkennen sind. Es sollte gezeigt werden, dass aus den aufgenommen Daten ein Rückschluss auf die logistischen Prozesse gezogen und dadurch auf Begleitinformationen verzichtet werden kann. Mithilfe aufgenommener Zeit- und Bewegungsdaten sollten Bewegungsmuster erkannt und Prozesse in Aktivitätskategorien unterteilt werden. Als Grundlage dienten Szenarien aus der Logistik, welche Lagerprozesse abbilden. Die erhobenen Daten sollten zudem die Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten bilden. Ein weiteres Ziel war die Entwicklung ei-

ner Methodik und Vorgehensweise für die effiziente Datenerfassung, um die Ereignisdetektion an Paletten mithilfe von IMUs zu ermöglichen. Zudem wurde der erste Datensatz mit IMU-Bewegungsdaten für Paletten aufgenommen, vorverarbeitet und mit den relevanten Aktivitätsklassen annotiert, gelabelt mit relevanten Aktivitätsklassen erstellt.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Für die Durchführung des Vorhabens Pal2Rec waren mehrere Voraussetzungen notwendig.

Expertise der beteiligten Partner: Das Projekt profitierte von der Expertise beider Hauptpartner im Bereich der Logistik, Sensorik und der Aufnahme von Datensätzen. Das Fraunhofer IML gilt als erste Adresse in der ganzheitlichen Logistikforschung und verfügt über umfangreiche Forschungsschwerpunkte und Infrastruktur, darunter ein Verpackungslabor mit verschiedenen Prüfsystemen.
Der Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen betreibt ein Testbed für cyber-physische Systeme mit einem markerbasierten Motion Capturing System und hat umfassende Erfahrungen in der sensorbasierten menschlichen Aktivitätserkennung.

Entwicklung der logistischen Szenarien: Die Versuchsplanung erfolgte in Kooperation mit Industriepartnern sowie mit Fachexperten. Es wurden gängige Abläufe aus der Intralogistik verwendet und in Szenarien zur Versuchsaufnahme überführt.

Technische Infrastruktur zur Datenaufnahme: Die Infrastruktur für die Datenaufnahme wurde seitens Fraunhofer IML gestellt, um die geplanten Versuche unter reproduzierbaren Rahmenbedingungen durchzuführen und die Daten in entsprechender Qualität zu erheben. Es wurden Flurförderzeuge beider Projektpartner genutzt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens Pal2Rec umfasste mehrere zentrale Phasen, die in einer Laufzeit von neun Monaten realisiert wurden.
Zunächst stand die Auswahl geeigneter Hardware und die Entwicklung der notwendigen Sensorik im Vordergrund. Hierfür wurden Intertialsensoren (IMUs) (insb. Beschleunigungssensoren) ausgewählt und in eine Europalette integriert. Um einen Vergleich der Sensorik zu gewährleisten, wurde ein Sensorklotz mit Sensoreinschüben entwickelt und mittels 3D-Druck gefertigt. Parallel dazu erfolgte die Entwicklung eines Skripts, welches die gesammelten Sensordaten auslesen, visualisieren und synchron zu Kamerabildern wiedergeben konnte. In Abstimmung mit Industriepartnern wurden logistische Prozessschritte definiert und in Aktivitätsklassen unterteilt. Anschließend wurden im Reallabor Vorversuche und umfangreiche Feldversuche unter

reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt. Die Palette wurde dabei verschieden konfiguriert und bspw. beladen sowie unbeladen untersucht. Die Versuche wurden mit Kameraaufzeichnungen dokumentiert. Die erhobenen Daten wurden im Anschluss aufbereitet und manuell annotiert, wobei die Sensoraufnahmen mit den Videoaufnahmen synchronisiert und den definierten Aktivitätsklassen zugeordnet wurden. Ein Random Forest Klassifikator wurde mit den verschiedenen annotierten Sensordaten trainiert und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass das KI-Modell zuverlässig die definierten Aktivitätsklassen vorhersagen kann.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Aktivitätserkennung von Objekten und Subjekten ist ein aktuelles Forschungsfeld [1]. Bisherige Arbeiten stützen sich auf die Erkennung eines oder mehrerer Objekte mittels Kameraüberwachung oder Standardtechnologien wie RFID-Tags [2, 3]. Externe Verifikationen durch Begleitinformationen sind dabei notwendiger Bestandteil. Bislang existiert demnach keine Technologie, welche die Bewegungsparameter eines logistischen Objektes alleinstehend überwachen kann. Daraus folgend existiert kein einheitlicher Datensatz, welcher die Aktivitätserkennung von Objekten im logistischen Kontext adressiert. Bisher wird die Aktivitätserkennung überwiegend am Menschen untersucht [4]. In der Industrie existieren bereits Datenlogger, welche in der Lage sind, verschiedene Daten von Objekten aufzunehmen. Diese sind nicht auf den Anwendungsfall zugeschnitten und eine Interpretation der Daten, sowie eine Aktivitäts- und Mustererkennung im engeren Sinne ist nicht möglich. Relevante Normen, die im Projekt berücksichtigt werden, sind die DIN 30786 und die DIN EN 15433. Die DIN 30786 Transportbelastungen – Datensammlung von mechanisch-dynamischen Belastungen besteht aus zwei Teilen. Die Norm weist darauf hin, dass ein Mangel an ausreichend dokumentierten veröffentlichten Daten besteht, um Transporte wirtschaftlicher und umweltverträglicher zu gestalten (DIN 30786-1). Die DIN EN 15433 Transportbelastungen – Messen und Auswerten von mechanisch-dynamischen Belastungen besteht aus sechs Teilen und ermöglicht eine sachgerechte und einheitliche Dokumentation der Belastungen. In der Norm wird ebenfalls die mangelnde Datenlage in diesem Bereich hervorgehoben.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Geförderte Partner im Projekt Pal2Rec waren das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML und der Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der Technischen Universität Dortmund. Assoziierte Partner waren die MotionMiners GmbH, die Logistikbude GmbH und die Fachhochschule Dortmund. Diese haben mit ihrer Expertise das Projekt unterstützt. Während der

Projektlaufzeit ist eine Zusammenarbeit mit der Fakultät Statistik der Technischen Universität Dortmund entstanden. Die Fakultät Statistik hat Interesse an dem Projekt bekundet und haben sich bei der Versuchsplanung und den Auswertungen beteiligt. Die entsprechenden Mitarbeiterinnen sind Co-Autorinnen der wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die in diesem Projekt verfasst wurden.

2 Eingehende Darstellung

Das Projekt Pal2Rec wurde vom Fraunhofer IML und dem Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der TU Dortmund innerhalb von neun Monaten vollständig bearbeitet. Die eingehende Darstellung der Projektdetails ist folgend aufgeführt.

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

Beide Projektpartner erhielten Personalmittel für neun Monate und Mittel für Investitionen. Die Personalmittel wurden für die Durchführung der Aufnahmen, die Auswertungen, sowie Vor- und Nachbereitung genutzt. Als Investionen sind Käufe für Sensortechnik und Kamerasysteme für die Dokumentation angefallen. Die definierten Ziele

- Bau eines Demonstrators,
- Bereitstellung einer Auswertungs- und Annotationsmöglichkeit,
- Definition der Aktivitätsklassen und Taxonomie,
- Versuchsdurchführung,
- Datenaufbereitung und -auswertung

wurden alle fristgerecht und vollständig erfüllt.

Im Einzelnen wurde im Projekt Pal2Rec eine Methode bzw. Toolchain zur Erfassung von Bewegungsdaten mittels Inertialsensoren (IMUs) für Paletten entwickelt. Ein wesentliches Ergebnis ist die Erstellung des ersten Datensatzes namens SPARL, welcher IMU-Bewegungsdaten von Paletten enthält, die mit relevanten logistischen Aktivitäten gelabelt wurden. Dieser Datensatz, der auf Zenodo sowie in der Mobilithek öffentlich zugänglich ist, dient als Grundlage für die Forschung zur automatischen Erkennung von Palettenaktivitäten [5, 6]. Des Weiteren wurde die Machbarkeit der automatisierten Ereignisdetektion durch den Einsatz eines Random Forest Klassifikationsmodells demonstriert, wobei die Ergebnisse die Zielstellung der Machbarkeit erfüllen und Aktivitäten von Palettenbewegungen nachgewiesen werden können. Pal2Rec hat zudem eine erste Taxonomie für die sensorgestützte Aktivitätserkennung von Paletten definiert und damit ermöglich, dass Dritte ihre Daten mit dieser annotieren können.

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die Durchführung der Versuche waren Hardwareanschaffungen notwendig. Die genauen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises wurden dem

Projektträger im Rahmen des Erfolgskontrollberichts übermittelt. Zu den Positionen gehörten insbesondere Sensoren verschiedener Spezifikation (Abtastrate, Auflösung etc.) für die Durchführung der vergleichenden Versuche. Darüber hinaus wurde ein Kamerasystem für die Dokumentation der Versuche sowie für die Annotation der Trainingsdaten beschafft.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Innerhalb der Projektlaufzeit wurde die Machbarkeit der Aktivitätserkennung von Palettenbewegungen erfolgreich nachgewiesen und somit das angestrebte Ziel erfüllt. Vor dem Projekt gab es keine Kenntniss, ob Beschleunigungsdaten von Palettenbewegungen für eine Aktivitätserkennung genutzt werden können. Die Arbeiten sind in zwei Datensätzen und zwei wissenschaftlichen Publikationen bereitgestellt worden [5–8]. Somit sind die gesamten Ergebnisse open-source verfügbar und bieten einerseits die Möglichkeit durch weitere Forschung an diesen Themenkomplex anzuknüpfen und andererseits für Unternehmen ein Geschäftsmodell auf den geleisteten Vorarbeiten aufzubauen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Alle Daten des Projektes sind auf der Plattform Zenodo in den beiden Datensätzen veröffentlicht [5,6]. Ebenso ist eine Verknüpfung in der Mobilithek des BMDV erfolgt [9]. Dritte können die erhobenen Daten für eine eigene Auswertung oder ein Training von KI-Modellen nutzen und so auf den Vorarbeiten aufbauen. In den zugehörigen Veröffentlichungen ist die Methodik und Vorgehensweise des Projektes beschrieben, sodass Dritte die Versuche selbst wiederholen oder erweitern könnnen. Die Datensätze beinhalten eine Verlinkung auf ein GitHub Repository, in welchem der gesamte Programmcode für die Auswertung und Analyse bereitgestellt ist.
Primärer Nutzen des Projekts ist der Nachweis der Machbarkeit und somit die Eröffnung von Anknüpfungspunkten. Durch weitere Forschung kann eine breite Datenbasis erzeugt werden, die im industriellen Kontext eingesetzt werden kann. Perspektivisch kann die Aktivitätserkennung zu Transparenz und Prozessverbesserungen in der Logistik führen und zu erheblichen ökonomischen sowie ökologischen Mehrwerten führen.

2.5 Während der Laufzeit bekannt gewordene Fortschritte seitens Dritten

Die Vorgehensweise und die erreichten Ergebnisse des Projekts Pal2Rec sind neuartig. Den Zuwendungsempfängern sind keine ähnlichen Projekte oder Erkenntnisse bekannt, die im Bereich der Aktivitätserkennung von

Palettenbewegungen anhand von Beschleunigungsdaten durchgeführt wurden. Projekte angrenzender Themenbereiche nutzen beispielsweise GPS-Daten oder beschränken die Datenauswertung auf eine Schwellwertbetrachtung und stehen somit nicht in Konkurrenz zu Pal2Rec.

2.6 Veröffentlichungen

Die Gesamtheit der getätigten Veröffentlichungen ist in Tabelle 2 aufgeführt. Es ist hervorzuheben, dass die Forschung breite mediale Aufmerksamkeit erfahren hat und zahlreiche Fachveröffentlichungen erschienen sind, deren Autorenschaft jedoch nicht bei den Projektpartnern liegt und somit nicht aufgeführt wurden. Weiterhin wurde das Projekt neben der durchgeführten Auftakt- und Abschlussveranstaltung im Rahmen von Veranstaltungen, wie Messen und Konferenzen, vorgestellt. Eine Übersicht der Veranstaltungen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Einbindung von Pal2Rec in die Institutsführungen sorgt weiterhin für große Aufmerksamkeit für das Projekt.

Name	**Art**
The art of circularity	Industrieveranstaltung
Emerging Technologies and Factory Automation	Konferenz
FachPack	Fachmesse
Fachkolloqium Logistik der Wissenschaftlichen Gesellschaft für technische Logistik e.V.	Konferenz
Palettensymposium	Fachsymposium
Test Camp Intralogistics	Fachmesse
EMPACK	Fachmesse
Deutsches Verpackungsinstitut	Seminar

Tabelle 1: Für Öffentlichkkeitsarbeit genutzte Veranstaltungen

2.7 Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Im nachfolgenden Abschnitt werden die wesentlichen Ergebnisse des Pal2Rec Projekts dargelegt. Darüber hinaus sei auf die wissenschaftlichen und weiteren Publikationen (Tabelle 2) verwiesen.

Kategorie	Details
Name	Auftakt von »Pal2Rec«: Die Palette der Zukunft
Art	Pressemittelung Projektstart
Verlag / Publisher	Fraunhofer IML
Name	”Pal2Rec: Ein wichtiger Schritt zur Palette der Zukunft
Zeitschrift	f+h (Fördern und Heben) Ausgabe: 5/2024
Art	Artikel in Fachzeitschrift
Verlag / Publisher	Fördern- und Heben
Name	Data-driven, sensor-based taxonomy for environmental life cycle assessment of pallets
Art	Wissenschaftliche Publikation
Verlag / Publisher	20. Fachkolloqiuum der Wissenschaftlichen Gesellschaft für technische Logistik e.V. (WGTL)
Name	Smart pallets: Towards event detection using IMUs
Art	Wissenschaftliche Publikation
Verlag / Publisher	29. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)
Name	Forschungsprojekt Pal2Rec
Zeitschrift	Logistik Entdecken #25
Art	Artikel in Fachzeitschrift
Verlag / Publisher	Fraunhofer IML
Name	Palette mit Köpfchen
Zeitschrift	DVZ September 2024
Art	Artikel in Fachzeitschrift
Verlag / Publisher	Deutsche Verkehrs-Zeitung
Name	Jahresbericht
Zeitschrift	Jahresbericht Fraunhofer IML
Art	Artikel
Verlag / Publisher	Fraunhofer IML
Name	Sensor-based Pallet Activity Recognition in Logistics (SPARL Version 1 & 2) - A multi-modal Dataset
Art	Datensatz
Verlag / Publisher	Zenodo
Name	Pal2Rec bringt Licht ins Dunkel der Intralogistik
Art	Pressemitteilung
Verlag / Publisher	Fraunhofer IML

Tabelle 2: Publikationen