

Evaluation der Akkuratheit von markerlosen Motion-Capture-Systemen zur ergonomischen Bewertung von Arbeitsplätzen in der Logistik

Tim STEINEBACH¹, Eric H. GROSSE², Christoph H. GLOCK², Jurij WAKULA¹,
Alexander LUNIN²

*¹ Institut für Arbeitswissenschaft, TU Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, D-64287 Darmstadt*

*² Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management, TU Darmstadt
Hochschulstraße 1, D-64289 Darmstadt*

Kurzfassung: Trotz der fortschreitenden Automatisierung werden Güter in der Logistik häufig noch manuell bewegt. Um körperliche Belastungen an den betroffenen Arbeitsplätzen mithilfe von Bewertungsverfahren zu bestimmen, können Motion-Capture-Systeme eingesetzt werden. Im Rahmen einer Laborstudie wurde überprüft, ob die Akkuratheit von zwei markerlosen Motion-Capture-Systemen ausreicht, um Bewegungen des Oberkörpers in realen Arbeitssituationen der Logistik zu erfassen. Hierbei handelt es sich um Microsoft Kinect V2 und das Captiv L7000 Premier-System. In einer Probandenstudie wurden ausgewählte Gelenkwinkel bei einer Aufgabe aus der Kommissionierung erfasst und dann mit einem Gold-Standard (Winkelskala) verglichen. Für das Captiv-System zeigen sich geringe mittlere absolute Fehler und eine hohe Korrelation mit dem Gold-Standard für alle Bewegungen. Kinect V2 besitzt ebenso eine hohe Akkuratheit bei einfachen Bewegungen, sofern es zu keinen Verdeckungen der Körpergliedmaßen kommt. Bei Verdeckung durch ein Arbeitsobjekt oder bei Selbstverdeckung nimmt die Akkuratheit des Systems jedoch signifikant ab.

Schlüsselwörter: Captiv, Kinect V2, Motion Capture, Akkuratheit, Intralogistik

1. Einleitung

Die innerbetriebliche Logistik und insbesondere die Kommissionierung tragen aufgrund ihres hohen Personal- und Kostenaufwands entscheidend zum Erfolg von Unternehmen bei [ten Hompel et al. 2011]. Trotz fortschreitender Automatisierung sind die meisten Arbeitsplätze in der Intralogistik durch eine manuelle Handhabung von Lasten charakterisiert [de Koster et al. 2007].

Bisherige Planungsmodelle für die Intralogistik bzw. Kommissionierung berücksichtigen wegen des hohen Kostendrucks bisher jedoch fast ausschließlich wirtschaftswissenschaftliche Parameter, wie beispielsweise Pick- oder Durchlaufzeiten. Menschliche Variablen werden weitestgehend konstant gesetzt bzw. vernachlässigt, sodass die Planungsmodelle ein unvollständiges Abbild realer Arbeitsprozesse wiedergeben [Grosse et al. 2015; Battini et al. 2017].

Ein möglicher Ansatz ist die Integration von Belastungskennzahlen bestimmter Kommissioniertätigkeiten in gegebene Optimierungs-Konzepte. Hierfür notwendige

Eingangsgrößen, wie z.B. Körper- und Bewegungsdaten, könnten durch Motion Capture Systeme automatisiert bereitgestellt werden [Battini et al. 2015, Günthner et al. 2014]. Der Erhebungsaufwand würde sich damit bedeutend reduzieren. Im Rahmen dieser Studie sollen zwei Systeme – Microsoft Kinect V2 und Captiv L7000 Premier – untersucht und miteinander verglichen werden. Insbesondere soll geprüft werden, ob sie sich für die Bewegungsaufzeichnung in realen Arbeitssituationen der Intralogistik eignen.

Während in der Literatur keine Evaluierung des Captiv-Systems zu finden ist, wurde die Kinect V2 bereits in zahlreichen Artikeln auf ihre Akkuratheit untersucht. Die meisten Autoren greifen auf Vergleiche mit optischen, markerbasierten Motion Capture Verfahren [Clark et al. 2015, Manghisi et al. 2017] oder am Körper getragenen Sensoren, wie z.B. Xsens [Kim et al. 2017] als Gold-Standard zurück. Im Wesentlichen werden in den Laborversuchen gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Parametern des Gold-Standards festgestellt [z.B. Kuster et al. 2016, Otte et al. 2016, Eltoukhy et al. 2017].

Fraglich bleibt jedoch, ob die bekannten Schwächen der Kinect V2 bei Verdeckung von Körperteilen [Plantard et al. 2017] durch die Verwendung von mehreren Kinect-Sensoren aus verschiedenen Winkel in realen Anwendungen der Intralogistik behoben werden können oder ob Inertialsensor-basierte Systeme wie Captiv bei Feldversuchen zu bevorzugen sind.

2. Versuchskonzept

In der durchgeführten Studie sollten in einem Versuch mit 12 Probanden (Alter: $23,8 \pm 2,6$ Jahre; Größe: $177,3 \pm 9,4$ cm; Gewicht: $70,9 \pm 12,3$ kg) Bewegungen simuliert und gleichzeitig mit Kinect V2 und dem Captiv-System erfasst werden, um diese auf ihre Akkuratheit zu prüfen. Der experimentelle Aufbau und die Datenverarbeitung sind im Folgenden beschrieben.

2.1 Experimenteller Aufbau und Ablauf

Bei den beiden markerlosen Motion Capture Technologien handelt es sich zum einen um den kostengünstigen, aus der Spielkonsolenindustrie bekannten Microsoft Kinect V2-Sensor. Dieser erstellt mittels Infrarotstrahlung ein Tiefenprofil und kann somit über Algorithmen Körperteile bzw. Gelenke identifizieren. Die beiden Kinect-Sensoren wurden in einem Abstand von 2,5 m frontal vor dem Probanden bzw. 2,7 m (um einen Winkel von 80° versetzt) seitlich in einer Höhe von 1,5 m aufgestellt. Diese Anordnung erwies sich in Vorversuchen als robust. Zur Datenintegration mehrerer Kinect-Sensoren wurde für diese Studie die Software iPi Soft verwendet. Ebenfalls evaluiert wurde das Captiv-System des französischen Herstellers TEA, welches mit am Körper getragenen Inertialsensoren (Beschleunigungsmesser, Gyroskop, Magnetometer) ausgestattet ist.

Der Probandenversuch fokussierte drei Gelenkwinkel des Oberkörpers fokussiert, die für eine Erfassung von Körperhaltungen bzw. Bewegungen und damit für eine Bewertung der physischen Belastungen in der Intralogistik wesentlich sind. Hierbei handelte es sich um die Abduktions- und Flexionswinkel der Schulter sowie den Flexionswinkel des Rückens. Die Winkel wurden während einfachen dynamischen Bewegungen von beiden Systemen gleichzeitig und synchronisiert erfasst. Diese

dynamische Übung beinhaltete eine nacheinander ausgeführte Abduktion bzw. Flexion der Schulter bis auf einen Winkel von 90° sowie eine Flexion des Rückens.

Um eine Arbeitsaufgabe in der Logistik nachzustellen und den Einfluss der Verdeckung durch Arbeitsgegenstände zu evaluieren, wurden die dynamischen Bewegungen jeweils mit und ohne die Handhabung einer Lagerkiste (Maße: 0,35 m × 0,25 m × 0,25 m) durchgeführt. Als Gold-Standard diente eine höhenverstellbare Winkelskala, von welcher mittels synchronisierten Videomaterials Winkel abgelesen werden konnten [Matsen et al. 2016].

2.2 Verarbeitung der Rohdaten

Die Rohdaten des Kinect-Systems lagen als kartesische Koordinaten der Gelenke vor. Körperglieder, wie z.B. der Oberarm, mussten zunächst über lineare Algebra in Vektoren umgerechnet werden, um die Gelenkwinkel zu bestimmen. Des Weiteren konnten mithilfe der kartesischen Koordinaten anatomische Körperebenen gebildet werden. Bezüglich der mathematischen Modelle wurde sich an jenen von Lee et al. (2015) und Diego-Mas & Alcaide-Marzal (2014) orientiert. Zur Berechnung des Abduktionswinkels der Schulter wurde der Winkel zwischen der Sagittalebene und dem auf die Frontalebene projizierten Vektor des Oberarms kalkuliert. Analog wurde der Flexionswinkel der Schulter über den Winkel zwischen der Frontalebene und dem auf die Sagittalebene projizierten Vektor des Oberarms berechnet. Der Flexionswinkel des Rückens wurde über den Winkel zwischen einer virtuellen, vertikalen Ebene und dem Rumpfvektor [vgl. Lee et al. 2015] abgebildet. In der Software des Captiv L7000 hingegen konnten diese Gelenkwinkel automatisch berechnet und exportiert werden.

Um die beiden Systeme bezüglich ihrer Akkuratheit zu vergleichen, wird der Empfehlung von Willmott & Matsuura (2005) folgend die mittlere absolute Abweichung (MAE) vom Gold-Standard gewählt. Diese wird im Rahmen dieser Studie wie folgt definiert, wobei φ der gemessene Gelenkwinkel und n die Anzahl an Messpunkten ist:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\varphi_{Kinect\ V2/Captiv} - \varphi_{Gold-Standard}|}{n}$$

Die MAE wurden mittels zweiseitigem t-Test bzw. Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test auf signifikante Unterschiede zwischen den beiden Verfahren untersucht. Des Weiteren wird die Korrelation zwischen dem untersuchten Motion Capture System und dem jeweiligen Gold-Standard berechnet.

3. Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Studie deskriptiv dargestellt (siehe Tabelle 1). Die mittleren absoluten Abweichungen vom Gold-Standard bei dem Captiv-System bleiben jeweils unter 5°. Ebenso sind die entsprechenden Korrelationen mit dem Gold-Standard sehr hoch ($r > 0,87$) und statistisch signifikant.

Der Kinect V2-Sensor hingegen hat insbesondere bei der Flexion der Schulter deutlich höhere Abweichungen. Hiervon ist die linke Seite stärker betroffen als die rechte. Sämtliche MAE für Bewegung, bei denen eine Lagerkiste von den Proban-

den gehandhabt wird, sind höher als bei den korrespondierenden Bewegungen ohne die Lagerkiste.

Tabelle 1: *Mittlere Absolute Abweichung und Korrelation der Motion Capture Systeme in Bezug auf den Gold-Standard bei Bewegungen mit und ohne Lagerkiste (*p < 0,01; (S) Spearman Korrelations-Koeffizient; (P) Pearson Korrelations-Koeffizient)*

	Teilbewegung		MAE		Korrelation	
			Kinect V2	Captiv L7000	Kinect V2	Captiv L7000
Bewegung ohne Lagerkiste	Abduktion/ Adduktion Schulter	rechts	3,9°	2,6°	0,98* (P)	0,99* (P)
		links	2,8°	2,8°	0,97* (S)	0,98* (S)
	Flexion/ Extension Schulter	rechts	9,5°	4,1°	0,97* (P)	0,99* (P)
		links	20,9°	3,0°	0,49* (P)	0,99* (P)
	Flexion Rücken		2,4°	4,4°	0,97* (P)	0,90* (P)
Bewegung mit Lagerkiste	Abduktion/ Adduktion Schulter	rechts	5,0°	2,0°	0,89* (S)	0,99* (P)
		links	4,3°	2,8°	0,98* (P)	0,99* (P)
	Flexion/ Extension Schulter	rechts	10,2°	4,2°	0,93* (S)	0,94* (S)
		links	26,7°	3,4°	0,16 (S)	0,93* (S)
	Flexion Rücken		2,8°	3,7°	0,97* (S)	0,87* (S)

4. Diskussion

Im Folgenden werden die deskriptiven Ergebnisse diskutiert und die Frage geklärt, welches der beiden Systeme für Anwendungsfälle in der Intralogistik eine höhere Akkuratheit aufweist. Es lässt sich feststellen, dass das auf Inertialsensoren basierende System von Captiv abgesehen von der Flexion des Rückens akkuratere Werte als Kinect V2 liefert. Die geringe Abweichung und die gleichzeitig sehr hohen Korrelationen deuten eine relativ hohe Akkuratheit dieses Motion Capture Systems an. Ob diese Akkuratheit für bestimmte Analysen ausreichend ist, hängt letztendlich vom Kontext der Untersuchung ab. Entscheidend ist hierbei, ob die potentiellen Abweichungen vom wahren Wert die Interpretation der Ergebnisse ändern [Myles & Cui 2005]. Da Captiv L7000 nicht optisch arbeitet, hat die Handhabung der Lagerkiste wie erwartet keinen Einfluss auf die Messergebnisse. Die MAE mit und ohne Kiste besitzen keine signifikanten Unterschiede.

Anders gestaltet sich dies bei dem Kinect V2-Sensor. Während die Abduktion der Schulter und die Flexion des Rückens ebenfalls relativ akkurat erfasst werden können, sind die MAE der Flexion der Schulter mit über 20° Abweichung sehr hoch. Diese geringe Messqualität könnte in dem Effekt der Verdeckung begründet sein. Zum einen sind die Abweichungen bei der Bewegung mit der Lagerkiste signifikant höher als ohne die Kiste, da die durch die Lagerkiste verdeckten Gliedmaßen nicht korrekt erfasst werden können. Die zweite Kinect, welche die Bewegungen aus einem anderen Winkel verdeckungsfrei erfasst, scheint diese Effekte nicht kompensie-

ren zu können. Die verwendete Software iPi-Soft integriert die Daten beider Kinect-Sensoren und kommt so insgesamt zu weniger akkuraten Ergebnissen.

Weiterhin ist auch bei der Flexion der Schulter ohne Kiste ein deutlicher Unterschied zwischen der Messakkurtheit auf der linken und rechten Seite zu erkennen. Da die Bewegung beider Arme gleichzeitig ausgeführt wird, ist der linke Arm durch den rechten Arm für die frontale Kamera verdeckt. Die MAE der linken Schulter sind dadurch signifikant höher als die der rechten (MAE = 20,9° bzw. 9,5°). Ebenso ist zu beobachten, dass die Korrelationen mit der Winkelskala auf der linken, verdeckten Schulter deutlich geringer sind. Obwohl die seitliche Kinect im Gegensatz zu der frontalen mit keiner Verdeckung konfrontiert war, können deren Bewegungsdaten die Akkurtheit nicht entscheidend verbessern. Bei einer zusätzlichen Verdeckung durch die Kiste erhöhen sich die Abweichungen gar auf einen Wert von 26,7°.

Ebenso wird auch bei einer qualitativen Betrachtung der visualisierten Darstellung der erfassten Bewegungsdaten sichtbar, dass der linke Arm bei der Selbstverdeckung bzw. Gliedmaßen, die durch die Lagerkiste für einen Kinect-Sensor verdeckt sind, häufig nicht erkannt werden.

Diese Problematik ist beim Einsatz eines Kinect V2 in der Intralogistik dringend zu berücksichtigen. In einer Vielzahl von Tätigkeiten und Situationen, wie eta im Lager, kann es zu Verdeckungen der Arbeitsperson kommen, beispielsweise durch Kommissionierwagen, Hebehilfen, im Gang stehende Artikel oder die transportierte Ladung. Einschränkungen der Akkurtheit des Kinect-Systems sind deshalb bei einer praktischen Anwendung in realen Lagerumgebungen wahrscheinlich. Des Weiteren deckt der Kinect-Sensor nur einen kleinen Erfassungsraum ab, welcher insbesondere durch verwinkelte Lagerstrukturen weiter reduziert werden kann. Für eine ganzheitliche Bewegungserfassung im Lager wären damit sehr viele Sensoren notwendig. Ferner erschweren auch andere Einflüsse, wie z.B. bewegliche Objekte im Hintergrund oder einfallendes Tageslicht, das Motion Capturing zusätzlich. Für Forschungszwecke wäre es jedoch möglich, spezifische Bewegungen, wie z.B. einen Greifvorgang in der Kommissionierung, zu simulieren und diese zu bewerten.

Das Captiv-System hingegen besitzt für die evaluierten Gelenkwinkel Abweichungen in Größenordnungen, die als Eingangsgröße einiger Beurteilungsverfahren ausreichend sind. Außerdem ist es durch die direkte Anbringung am Körper des Mitarbeiters auf einer größeren Arbeitsfläche, wie einem Lager, anwendbar. Beachtet werden muss, dass die Sensoren gegebenenfalls bei der Ausübung der Tätigkeit stören oder gar verrutschen können. Darüber hinaus ist die nicht unerhebliche Rüstzeit und die zeitaufwendige Initialisierungsphase des Systems zu berücksichtigen.

Insgesamt ist das Captiv-System dem Kinect V2 für komplexe Bewegung in realen Umgebungen der Intralogistik vorzuziehen, da insbesondere im Falle von Verdeckungen durch Arbeitsgegenstände eine höhere Akkurtheit erreicht werden kann.

Eine Ausweitung der Untersuchung auf weitere Gelenkwinkel und Versuche im Feld erscheint in der Zukunft sinnvoll. Ferner ist geplant, Bewegungsdaten als Eingangsgrößen für Belastungsbewertungsverfahren zu verwenden, um diese in vorhandene Planungsmodelle der Intralogistik zu integrieren.

5. Literatur

Battini D, Calzavara M, Persona A, Sgarbossa F, Visentin V (2017) Fatigue and recovery: research opportunities in order picking systems. IFAC-PapersOnLine 50:6882-6887.

- Battini D, Calzavara M, Persona A, Sgarbossa F (2015) Linking human availability and ergonomics parameters in order-picking systems. *IFAC-PapersOnLine* 48:345-350.
- Clark RA, Pua YH, Oliveira CC, Bower KJ, Thilarajah S, McGaw R (2015) Reliability and concurrent validity of the Microsoft Xbox One Kinect for assessment of standing balance and postural control. *Gait & posture* 42:210–213.
- De Koster R, Le-Duc T, Roodbergen, KJ (2007) Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research* 182:491-501.
- Diego-Mas JA, Alcaide-Marzal J (2014) Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work. *Applied ergonomics* 45:976-985.
- Eltoukhy M, Kuenze C, Oh J, Wooten S, Signorile J (2017) Kinect-based assessment of lower limb kinematics and dynamic postural control during the star excursion balance test. *Gait & posture* 58:421–427.
- Grosse EH, Glock CH, Jaber, MY, Neumann WP (2015) Incorporating human factors in order picking planning models: framework and research opportunities. *International Journal of Production Research* 53:695-717.
- Günthner W, Deuse J, Rammelmeier T, Weisner, K (2014) Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiterbelastungen in Kommissioniersystemen (ErgoKom) – Forschungsbericht.
- Kim Y, Baek S, Bae BC (2017) Motion capture of the human body using multiple depth sensors. *ETRI Journal*, 39:181-190.
- Kuster RP, Heinlein B, Bauer CM, Graf ES (2016) Accuracy of Kinect One to quantify kinematics of the upper body. *Gait & posture* 47:80–85.
- Lee SH, Yoon C, Chung SG, Kim HC, Kwak Y, Park HW, Kim K (2015) Measurement of shoulder range of motion in patients with adhesive capsulitis using a kinect. *PloS one* 10:1-12.
- Manghisi VM, Uva AE, Fiorentino M, Bevilacqua V, Trotta GF, Monno G (2017) Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor. *Applied ergonomics* 65:481–491.
- Matsen FA, Lauder A, Rector K, Keeling P, Cheronos AL (2016) Measurement of active shoulder motion using the Kinect, a commercially available infrared position detection system. *Journal of shoulder and elbow surgery* 25:216-223.
- Myles PS, Cui J (2007) Using the Bland-Altman method to measure agreement with repeated measures. *British journal of anaesthesia* 99:309–311.
- Otte K, Kayser B, Mansow-Model S, Verrel J, Friedemann P, Brandt AU, Schmitz-Hübsch T (2016) Accuracy and Reliability of the Kinect Version 2 for Clinical Measurement of Motor Function. *PloS one* 11:1-17.
- Plantard P, Muller A, Pontonnier C, Dumont G, Shum H, Multon F (2017) Inverse dynamics based on occlusion-resistant Kinect data: Is it usable for ergonomics?. *International Journal of Industrial Ergonomics* 61:71-80.
- Ten Hompel M, Sadowsky V, Beck M (2011) Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Willmott CJ, Matsuura K (2005) Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research* 30:79-82.

Danksagung: Ein besonderer Dank gilt Frau Lisa-Maria Baron für die Unterstützung bei der iterativen Entwicklung und Vorbereitung des Versuchsaufbaus.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten

65. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Professur Arbeitswissenschaft
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden

Institut für Arbeit und Gesundheit
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

27. Februar – 1. März 2019

GfA-Press

Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019

**Professur Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,
Technische Universität Dresden;
Institut für Arbeit und Gesundheit, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Dresden**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2019
ISBN 978-3-936804-25-6

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Konferenzband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2019 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de