

Entwicklung und Validierung einer belastungsabhängigen Positionskorrektur eines Heukrans

Franz Stübler¹, Florian Kitzler¹, Martin Seiringer¹, Johannes Landrighinger²,
Andreas Gronauer¹ und Norbert Barta¹

Abstract: In der Automatisierung einer Stückgutmanipulation in der Biomasselogistik müssen Konzepte umgesetzt werden, welche eine hohe Positionsgenauigkeit für die Materialaufnahme und -abgabe gewährleisten. Diese müssen das Strukturverhalten und die Belastungssituation der Manipulatoren berücksichtigen. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Modellansatz entwickelt, welcher auf Basis der Messungen der Auslegerlänge, des Auslegerwinkels und der Hubzylinderlänge einen Positionskorrekturfaktor errechnet. Mit dem Modellansatz konnten Positionierungsfehler durch die Starrkörperkinematik im Median von 187 mm auf 7 bis 8 mm reduziert werden. Bei maximalen Belastungen konnten Abweichungen von 244 mm auf 22 mm reduziert werden.

Keywords: Positionskorrekturmodell, Gewichtsmessung, Robotik, Stückgutmanipulation

1 Einleitung

In der Stückgutmanipulation mit Robotern spielt für die Präzision von Greif- und Absetzvorgängen das Verformungsverhalten eine wesentliche Rolle. Eine relative Positionskorrektur kann mit Kamera oder Lasersystemen erfolgen, was jedoch hohe Rechenleistungen erfordert bzw. die Arbeitsgeschwindigkeit senkt. Um ohne ein Feedbacksystem die Genauigkeit zu erhöhen, werden basierend auf dem elastischen Verhalten des Roboters statische Positionskorrekturmodelle eingesetzt [HSC08]. Bei der Automatisierung von hydraulischen Kränen zur Handhabung von Biomasse müssen im Gegensatz zu Roboterlösungen aus der Industrie weite Wegstrecken überwunden und ein großes Arbeitsfeld bedient werden. Aufgrund der begrenzten Einbausituation in bestehende Infrastrukturen werden Fahrwerksysteme mit Teleskopausleger basierend auf Schweißkonstruktionen verwendet, welche ein weiches Strukturverhalten bedingen und somit die Positionierung erschweren. Diese Fragestellungen wurden bereits für Betonpumpen behandelt [SV96; HKK13]. Die Belastung bei Betonpumpen erfolgt in der Anwendung hauptsächlich durch das Eigengewicht, womit ein Modellansatz mit Hilfe von Mehrkörpersystemen (MKS) verwendet wurde.

In der Biomasselogistik erfolgt die Hauptbelastung auf Basis der transportierten Masse. Dies macht es erforderlich, geeignete Messsysteme für diese Größe in Korrekturkonzepten

¹ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Landtechnik, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich, franz.stuebler@boku.ac.at, florian.kitzler@boku.ac.at, martin.seiringer@boku.ac.at, norbert.barta@boku.ac.at
² Lasco Heutechnik GesmbH, Lascostraße 1, 4891 Pöndorf, jlandrighingerj@lasco.at

zu integrieren. Zusätzlich sind die verwendeten Gleitlager einem Verschleiß unterworfen, was eine Änderung des Systemverhaltens mit der Zeit bedingen kann. Auch die unterschiedlichen Einbausituationen, unterschiedliche Krantypen und die Lagerung der Kranträger würde eine Modellierung mit MKS für jedes Projekt erforderlich machen. Um trotzdem bei der automatisierten Handhabung von Stückgütern wie Heuballen eine ausreichende Genauigkeit des Tool Center Points (TCP) zu erzielen, sollen in dieser Arbeit messdatenbasierte Modellansätze für eine Positionskorrektur entwickelt werden, welche in automatischen Kalibrierverfahren regelmäßig adaptiert werden können, um eine von der Zeit und der Einbausituation unabhängige statische Positionskorrektur umsetzen zu können.

2 Material und Methode

In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche Korrekturmodelle für einen Heukran vom Typ M45 (LASCO Heutechnik GmbH, Österreich, Lochen am See) entwickelt und evaluiert. Ausgangslage ist ein kinematisches Starrkörpermodell des Kranes (K0), das auf Basis der Messung von Hubzylinderlänge und Auslegerwinkel die Position des TCP des Greifers berechnet. Für einen Ausgleich der Verformungen wurden zusätzlich zwei Neigungssensoren an der Basis des Auslegers und Endeffektor integriert (siehe Abb. 1 links), um eine Verformungskorrektur zu berechnen. Dafür wurden drei unterschiedliche Modellansätze untersucht. Korrektur K1 enthält eine lineare Winkelkorrektur über die Neigung der Basis über die Auslegerlänge. Korrektur K2 verwendet einen Durchbiegungsterm abhängig von der Länge des Auslegers und dem Differenzwinkel zwischen Endeffektor und Basis. Korrektur K3 verwendet nur den Neigungssensor an der Basis in Kombination mit einem quadratischen Durchbiegungsansatz abhängig von der Auslegerlänge.

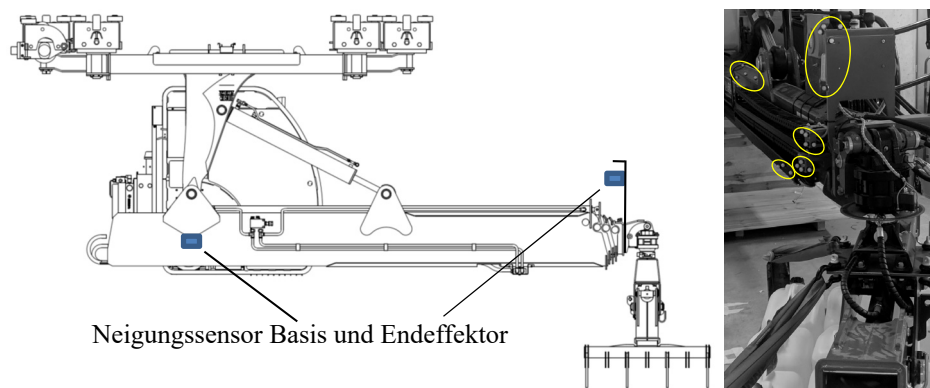


Abb. 1: Modell des Heukrans in der Seitenansicht mit Positionen der Neigungssensoren (links, Quelle: LASCO GmbH) und Position der Reflexionsmarker an den Auslegerelementen (rechts)

Als Referenzsystem für die Validierung der Positionskorrektur diente das Objekt Tracking System Vantage V5 (Vicon Motion Systems Ltd, England), das aus 8 hochauflösenden aktiven Infrarotkameras besteht und mit Reflexionsmarkern (siehe Abb. 1 rechts) versehene Objekte in Echtzeit verfolgt. Die Gelenksdaten der am Kran montierten Sensoren wurden über einen OPC-Server auf der Steuerungs-SPS des Krans bereitgestellt. Eine selbst entwickelte MATLAB-Applikation verwaltet die Referenz- und OPC-Datenströme und speichert die Daten strukturiert und synchronisiert zur weiteren Auswertung ab. Die Belastung des Krans erfolgte über bis zu 16 Wasserkanister mit je 20 kg Gewicht. Die Messungen wurden im Labor der Universität für Bodenkultur durchgeführt.

2.1 Positionsabweichung der L1-Norm bei unterschiedlichen Korrekturtermen

Zur Parametrierung der Modelle wurden Kalibrationsmessungen durchgeführt. Dazu wurde der Kran ohne und mit voller Belastung in vorgegebene Stellungen gebracht und die tatsächliche Position des TCP bestimmt. Dafür wurden je zwei Messreihen für zwei Auslegerwinkel (Hubzylinderlängen 1440 mm und 1360 mm) durchgeführt. Jede Messreihe bestand aus vier unterschiedlichen Auslegerlängen (2845 mm, 4995 mm, 6095 mm und 7150 mm) welche vierfach wiederholt wurden. Auf Basis der parametrisierten Regressionsmodelle wurden in der SPS ein Höhenversatz berechnet und in die Sollwertvorgabe der Regelung berücksichtigt. Für die Validierung wurden 20 Messreihen mit vier Hubzylinderpositionen (1360 mm, 1387 mm, 1413 mm und 1440 mm) und fünf Auslegerlängen (2850 mm, 3295 mm, 5000 mm, 6075 mm, und 7150 mm) und vier Belastungsstufen (0 kg, 100 kg, 200 kg und 320 kg) durchgeführt. Jede Messreihe bestand aus je vier Wiederholungen für die drei Varianten (K0, K2 und K3). Die tatsächlichen Positionen wurden wiederum mit dem VICON Bewegungsanalysesystem bestimmt. Als Maß für die Güte des Modells wurde der Median der L1-Norm der Fehler bzw. der höchsten 5 %-Fehler der Messwerte verwendet.

2.2 Gewichtsmessung auf Basis der Kransensordaten

Der Differenzwinkel zwischen dem Winkelsensor an der Basis und dem über den Hubzylinder gemessenen Winkel des Auslegers beinhaltet auch Informationen über die Verformung und somit die Belastung des Kransystems. Eine Kalibrierung des Messsystems wurde auf Basis der Daten des Validierungsversuches herangezogen. Der Datensatz besteht somit aus 16 Messungen für jede der 20 Positionen, da pro Position vierfach angefahren für jeden der vier Korrekturterme K0, K1, K2 und K3. Die Kalibrierung erfolgte mit einer linearen Regression auf Basis der Differenzwinkel auf die Belastung für jede gemessene Auslegerlänge und einer quadratischen Regression des gesamten Datensatzes auf Basis der Winkelmessung in Kombination mit der Auslegerlänge über das Belastungsgewicht.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Positionsabweichung der L1-Norm bei unterschiedlichen Korrekturtermen

Die Ergebnisse der unkorrelierten Starrkörperkinematik zeigten eine starke Abhängigkeit von der Auslegerlänge (siehe Abb. 2 links). Während bei eingefahrenen Auslegerlängen kein relevanter Positionsfehler auftritt, ist bei voller Auslegerlänge eine Abweichung im Median der L1-Norm von 187 mm mit den 5 % bei 244 mm zu beobachten. Messungen an einem Kran vom Typ M90 (LASCO Heutechnik GmbH) mit einer Auslegerlänge von bis zu 14 m wiesen maximale Verformungen in der Größenordnung von 60-70 cm auf [HH18].

Während K1 noch einen deutlichen Belastungseinfluss aufweist, können mit den Korrekturmodellen K2 und K3 deutliche Verbesserungen erzielt werden (siehe Abb. 2 rechts). So verringert das Modell K2 den L1-Fehler im Median von 81 mm auf nur noch 7 mm (Fehler Top 5 % = 22 mm) und das Modell K2 auf 8 mm (Fehler Top 5 % = 29 mm).

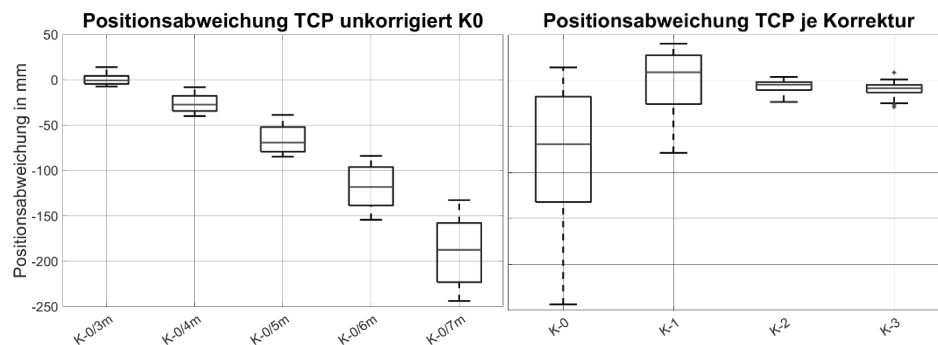


Abb. 2: Abweichung der L1-Norm für die mit der Starrkörperkinematik K0 berechnete Position zur tatsächlichen Position abhängig von der Auslegerlänge für vier Belastungsstufen mit $n=4$ (links) und Vergleich der L1-Norm der Positionsabweichungen für die Korrekturmodelle K0, K1, K2 und K3 in vier Belastungsstufen und fünf Auslegerpositionen mit je $n=4$ (rechts)

Ein Vergleich K2 und K3 zeigt qualitativ keine relevanten Unterschiede (siehe Abb. 3). Während Modell K2 bei eingefahrenem Ausleger im Median eine Abweichung von nahezu 0 mm aufweist, ist bei dem Modell K3 bereits ein kleiner Offset von 4 mm zu erkennen. Bei voller Auslegerlänge schneidet das Modell K3 dafür im Median mit einer Abweichung von 9 mm besser ab als Modell K2 mit 13 mm, wobei bei Modell K3 eine höhere Streuung aufgrund der Gewichtsbelastung auftritt.

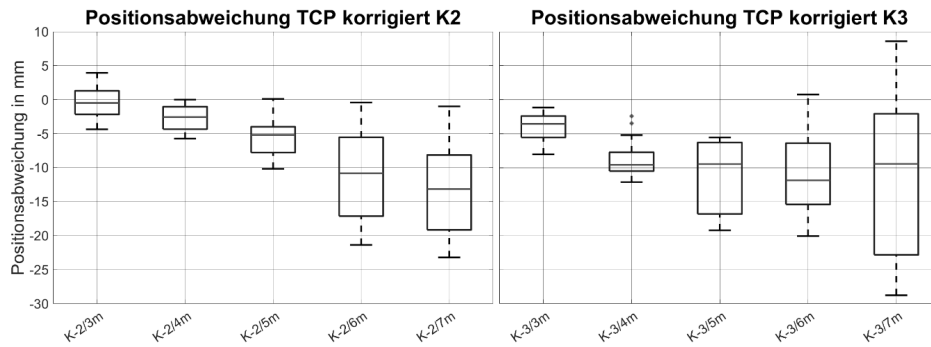


Abb. 3: Vergleich des Positionsfehlers der L1-Norm für das Korrekturmodell K2 (links) mit dem Korrekturmodell K3 (rechts) abhängig von der Auslegerlänge mit vier Belastungsstufen und $n=4$.

Für die gemessenen Lagen eignen sich nach unserer Analyse die beiden Korrekturmodelle K2 und K3 gleichermaßen, um eine nötige Genauigkeit im Automatikbetrieb des Krans zu erreichen. Da das Korrekturmodell K3 nur einen Neigungssensor an der Basis des Auslegers verwendet und somit Anschaffungskosten und Verkabelungsaufwand reduziert sind, wird dabei K3 bevorzugt.

3.2 Gewichtsmessung auf Basis der Kransensordaten

Die Ergebnisse der Gewichtsmessung sind in Abb. 4 dargestellt. Die relative Genauigkeit steigt dabei mit der Auslegerlänge. Während bei einer Auslegerlänge von 2850 mm ein Standardfehler (Root Mean Square Error – RMSE) von 25,3 kg (7,9 % des Messbereichsendwert ME) mit einem R^2 von 0,955 erreicht wird, liegt der RMSE bei voller Auslegerlänge von 7150 mm bei 14,1 kg (4,4% des ME) mit einem R^2 von 0,986 (siehe Abb. 4 links). Die 5 % und 95 %-Perzentile liegen bei kurzer Auslegerlänge bei -36,4 kg und 50,5 kg und bei langer bei -20,2 kg und 27,4 kg.

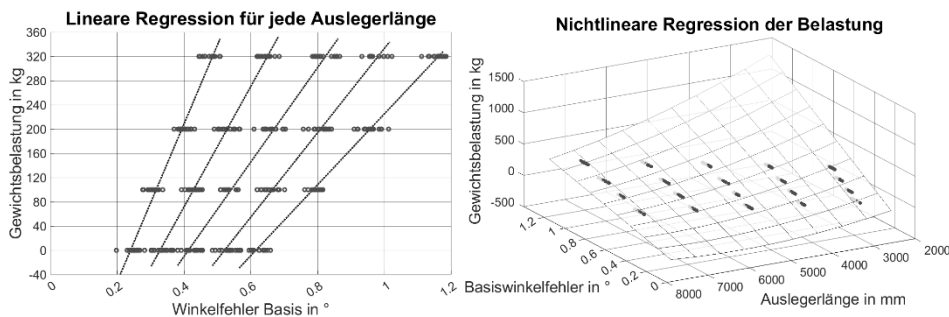


Abb. 4: Ergebnisse der Regressionen der Kranbelastung mit einem linearen Ansatz über die Winkelmessung je Auslegerlänge (links) und einen quadratischen über die Winkelmessung kombiniert mit der Auslegerlänge

Die quadratische Regression über die gesamte Messebene von Basiswinkel und Auslegerlänge liefert einen Standardfehler (RSME) von 21,0 kg (6,6% von ME – Abb. 4 rechts).

4 Conclusio und Ausblick

Die Positionskorrektur liefert für die Anwendung in der Biomasselogistik eine ausreichende Genauigkeit. Die Gewichtsmessung liefert gute Ergebnisse nur bei ausgefahrenem Ausleger. Die Winkelmessung bietet jedoch einen einfachen Ansatz für eine Biomasseabschätzung. Die Zuverlässigkeit muss noch unter Praxisbedingungen evaluiert werden. Die Daten stammen aus einem Laborversuch bei nur kleinen Abweichungen des Auslegerwinkels aus der Horizontalen. Eine Modellvalidierung von stark abweichenden Auslegerwinkeln sowie der Einfluss der Kranlaufbahn sowie der Lagerung der Kranlaufbahn müssen noch in weiterführenden Versuchen in einem realen Setting ermittelt werden. In weiterführenden Arbeiten sollen geeignete Messsysteme und Kalibrierungsroutinen auf Basis der getesteten Modelle entwickelt werden. Ziel ist es, ein Messsystem zu entwickeln, welches unabhängig vom Krantyp eingesetzt werden kann und zeitliche und produktabhängige Varianzen auf Basis von Verschleiß und Fertigungstoleranzen mitberücksichtigt.

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Firma LASCO Heutechnik GmbH finanziert und durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG im Rahmen des Basisprogramms gefördert.

Literaturverzeichnis

- [HH18] Hehenberger, J.M.; Heinzl, A.J.: Verhalten eines Heukranauslegers bei unterschiedlichen Lastbedingungen. 2018.
- [HKK13] Henikl, J.; Kemmettmüller, W.; Kugi, A.: Modeling and control of a mobile concrete pump. In (IFAC Hrsg.): 6th IFAC Symposium on Mechatronic System April 10-12, Hangzhou 2013. Volumes 46.5/13, S. 91-98, 2013.
- [HSC08] Hwang, J.C.; Seo, J.H., Choi; Y.W.; Yim, H.J.: Error compensation of a large scale LCD glass transfer robot. Mechatronics 17/07, S. 191-198, 2007
- [SV96] Surdilović, D., and M. Vukobratović.: Deflection compensation for large flexible manipulators. Mechanism and Machine Theory 31.3/96, S. 317-329, 1996.