

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst die Roboter und der LRF-Sensor, sowie weitere Geräte, die zur Abtastung der Werkzeugseite eingesetzt wurden vorgestellt und ein entsprechendes Messverfahren entwickelt. Anschließend wurde zur Durchführung der Messungen, sowohl im Labor, als auch bei Stäubli, ein Programm entwickelt, welches eine Kommunikation zwischen Sensor und Roboter gewährleistet und erlaubt die Messung über den Computer zu steuern. Es wurden Verfahren zur Bestimmung der Lage und der Position der Werkzeugseite im Raum, zunächst in MATLAB implementiert und auf die Messdaten, welche im Labor, sowie bei Stäubli aufgenommen wurden angewendet. Zudem wurde die Anwendbarkeit dieser Verfahren und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in der Praxis, sowie mögliche Verbesserungen des Messverfahrens, durch Vergleich der Ergebnisse, bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Messraten untersucht. Das Steuerungsprogramm wurde anschließend um eine Funktion, in der die am besten geeigneten Verfahren zur Auswertung implementiert sind, erweitert. Zu guter Letzt fand ein Performance Test des entwickelten Programms auf einem tragbaren Computer statt.

Ein besonderes Augenmerk wurde bei den Untersuchungen auf die Vergleichbarkeit der Verfahren, sowie die Einhaltung der Toleranz von 0,1 mm bei der Positionsermittlung gelegt. Daher wurden insbesondere zur Ermittlung der Position der Werkzeugseite, im Weltkoordinatensystem des Roboters, algebraische Verfahren ausgewählt, die eine hohe Stabilität und Genauigkeit mit sich bringen. Zur Ermittlung der Position kamen die Methode nach Pratt, Taubin, Kåsa und Landau zum Einsatz. Eine Bestimmung der Lage durch Berechnung der Ebene, der Werkzeugseite erfolgte einerseits über einen entwickelten RANSAC Algorithmus und andererseits durch die Lösung eines Problems der kleinsten Fehlerquadrate. Letzteres wurde mit der Singulärwertzerlegung, sowie analytisch gelöst. Es wurde bei den Ebenen besonders darauf geachtet, dass diese die Messpunkte auf der Oberseite der Führungssäulen möglichst genau approximieren um ein verwertbares Ergebnis zu erhalten.

Zusammenfassend lassen sich aus den Ergebnissen der Auswertung und dem Vergleich der Verfahren folgende Schlussfolgerungen ziehen: Bei einer hohen Messdatendichte, also entweder bei einer niedrigen Bewegungsgeschwindigkeit des Roboterarms, oder einer erhöhten Messrate können, hinsichtlich der Positionserkennung, Ergebnisse erzielt werden, die innerhalb des vorgeschriebenen Toleranzbereiches liegen. Des Weiteren sind diese Ergebnisse, wie die Auswertung der zehn Messungen im Testlabor bei der geringsten Geschwindigkeit gezeigt haben, auch reproduzierbar. Mit zunehmender Geschwindigkeit bei der Messung, nimmt allerdings die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei allen Verfahren ab. Dieses Verhalten kann allerdings durch eine Erhöhung der Messrate kompensiert werden. Eine Betrachtung der Verfahren hat gezeigt, dass mit der Methode nach Pratt die größte Genauigkeit erzielt

werden kann, dieses Verfahren aber bei fehlerbehafteten Messungen in den meisten Fällen versagt. Das Verfahren nach Taubin tendiert stets zu einer Verschiebung in Richtung des Ursprungs, weshalb dieses Verfahren nicht zu empfehlen ist. Eine gute Alternative zur Methode von Pratt liefert das Landau Verfahren. Hinsichtlich der Genauigkeit liefert es zwar geringfügig schlechtere Ergebnisse, dafür ist es aber wesentlich stabiler. Es hat sich außerdem gezeigt, dass die Verfahren von Landau und Kása die gleichen Ergebnisse bei unterschiedlichen Zielfunktionen liefern. Darüber hinaus lässt sich eine Verbesserung der Zentrumsposition erzielen, wenn diese über eine Mittelung der Zentren der drei Führungssäulen berechnet wird. Mit der Methode nach Pratt und dem Verfahren von Landau stehen also zwei Verfahren zur Positionsbestimmung zur Verfügung, die Ergebnisse unterhalb der Toleranzgrenze liefern. Die Untersuchungen haben ebenfalls gezeigt, dass die Geschwindigkeit in Kombination mit einer Messrate von 30 kHz auf bis zu 15 mm/s erhöht werden kann. Außerdem kann die Anzahl der benötigten Messbahnen je Führungssäule auf vier reduziert werden. Damit ist eine schnellere Messung, mit einem noch vernachlässigbaren Verlust in der Genauigkeit der Ergebnisse möglich. Trotz der hohen Genauigkeit der meisten Ergebnisse, tritt dennoch eine breite Streuung in den ermittelten Zentren auf. Diese Streuung folgt einem Trend in Richtung des Ursprungs des Weltkoordinatensystems. Eine Ursache für diesen Trend konnte nicht festgestellt werden. Allerdings korreliert der Betrag der Verschiebung mit der Höhe der Messgeschwindigkeit.

Eine Untersuchung der Verfahren zur Ermittlung der Ebene der Werkzeugseite hat gezeigt, dass alle drei Verfahren fehlerhafte Messungen kompensieren können und in der Lage sind Ausreißer erfolgreich zu filtern. Bei geringen Messgeschwindigkeiten liefern daher alle drei Verfahren einen perfekten Fit. Bei einer Reduzierung der Messdatendichte, sei es durch zunehmende Geschwindigkeit oder eine Halbierung der Anzahl der Messbahnen, zeigen sich allerdings wesentliche Verschlechterungen bei Verwendung des RANSAC Algorithmus. Das SVD und LSE Verfahren können die geringere Messdatendichte besser ausgleichen und liefern auch bei der höchsten Geschwindigkeit 30 mm/s weiterhin einen perfekten Fit. Insgesamt liefert der entwickelte RANSAC Algorithmus bei einer hohen Messdatendichte geringfügig schlechtere Ergebnisse, als die beiden anderen Verfahren und benötigt eine wesentlich höhere Berechnungszeit. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte sind das LSE und SVD dem RANSAC vorzuziehen. Eine Einsatzfähigkeit in der Praxis ist durch ihre Robustheit und hohe Genauigkeit gewährleistet.

Nichtsdestoweniger hat sich auch bei den Algorithmen zur Lagebestimmung gezeigt, dass die bei einer Geschwindigkeit von 8 mm/s aufgezeichneten Messdaten für eine Auswertung nicht geeignet sind. Da dies bei allen zehn Messungen aufgetreten ist, liegt der Schluss nahe, dass Messungen bei dieser Geschwindigkeit mit dem RX-270 nicht verwendbar sind und besser auf höhere Geschwindigkeiten zurückgegriffen werden soll.

In dieser Arbeit wurde folglich nachgewiesen, dass entsprechende Verfahren unter Einhaltung der Toleranz, zur Ermittlung der Position und Lage der Werkzeugseite verfügbar sind. Weiterhin wurde gezeigt das deren Praxisanwendung unter Laborbedingungen gegeben ist und eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse umsetzbar ist. Darüber hinaus wurde ein, auch auf portablen Endgeräten lauffähiges Programm zur Steuerung der Messung und Auswertung der Messdaten, mit einer grafischen Benutzeroberfläche entwickelt und erfolgreich getestet.

Weiterführende Arbeiten können einerseits mögliche Optimierungen des RANSAC Algorithmus, wie der Verbesserung der Berechnungsgeschwindigkeiten durch, beispielsweise eine Erweiterung auf den parallelen RANSAC, sowie eine mögliche Steigerung der Genauigkeit und der Stabilität untersuchen. Eine Verbesserung des Messverfahrens kann angestrebt werden, indem eine interne Bit-Schaltung zur Freigabe der Bewegung vom Sensor an den Roboter implementiert wird. Weiterhin kann untersucht werden, ob eine Vermessung anderer geometrischer Aspekte der Werkzeugseite zu genaueren Ergebnissen führt, als bei Verwendung der Führungssäulen. Eine Verbesserung der implementierten Verfahren durch statistisch ermittelte Korrekturfaktoren ist ebenfalls möglich.