

Zur Erweiterung und Bestimmung des geometrisch-mechanischen Parametermodells des IfE-Kalibrierroboters MP2 (rev. 2.0)

- Geodätische Woche 2014 -

Session - Angewandte Geodäsie und GNSS II

Institut für Erdmessung
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Motivation

Entwicklung der GNSS-Antennenkalibriereinheit

- ▶ seit 1989 intensive Forschung im Bereich der Empfangscharakteristiken geodätischer GPS/GNSS-Antennen
- ▶ erfolgreiche Umsetzung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung durch IfE und Geo++[®], [Seeber und Böder, 2002]; Vermarktung durch Geo++ seit 2002

Roboter	Jahr	Einrichtung
MP1	2000	Geo++ [®]
MP2	2000	IfE, Univ. Hannover
PCV3	2005	SenStadtUmBerlin
MP4	2009	Geo++ [®]
MP5	2009	Geo++ [®] (ersetzt MP1)
PCV6	2012	GeoScience Australia (GSA)
PCV7	2013	SenStadtUmBerlin (ersetzt PCV3)
andere Systeme		
„Pete“ (PTU)	2010	National Geodetic Survey, USA
FARCOM	2013	National Earthquake Infrastructure Service, China



© 2011, IfE

Referenzen: [Chen et al., 2013], [Geo++, 2013]

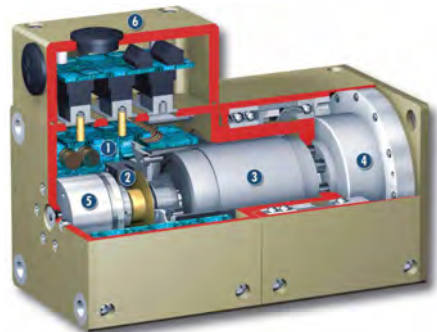
PowerCube / Schunk Robotermodul (PR-Rotationseinheiten)

Parameter	Einheit	Wert
Drehmoment	[Nm]	142
Spitzendrehmoment	[Nm]	280
Wiederholbarkeit	[°]	0.002
Winkelbeschleunigung	[°/s ²]	600
Winkelgeschwindigkeit	[°/s]	150
Auflösung	["]	4.0
Schnittstellen	CAN-Bus (u.a.)	

[Schunk, 2011]

Vorteile

- + modulares System (5 Komponenten; austauschbar)
- + Wasser- und Staubdicht nach IP54
- + Betriebstemperaturen [-5 °C; 50 °C]
- + seit 14 Jahren im Außendienst



1 Steuerelektronik

2 Encoder

3 Motor

4 HarmonicDrive®

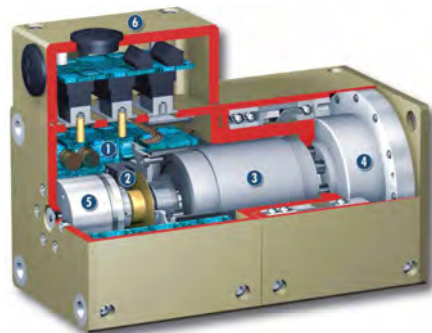
5 Bremse

6 Schutzkappe

PowerCube / Schunk Robotermodul (PR-Rotationseinheiten)

Parameter	Einheit	Wert
Drehmoment	[Nm]	142
Spitzendrehmoment	[Nm]	280
Wiederholbarkeit	[°]	0.002
Winkelbeschleunigung	[°/s ²]	600
Winkelgeschwindigkeit	[°/s]	150
Auflösung	["]	4.0
Schnittstellen	CAN-Bus (u.a.)	

[Schunk, 2011]



Vorteile

- + modulares System (5 Komponenten; austauschbar)
- + Wasser- und Staubdicht nach IP54
- + Betriebstemperaturen [-5 °C; 50 °C]
- + seit 14 Jahren im Außendienst

- 1 Steuerelektronik
- 2 Encoder
- 3 Motor
- 4 HarmonicDrive®
- 5 Bremse
- 6 Schutzkappe

Anforderung

Positionsgenauigkeit: 0.25 mm

Entwicklung des Roboter-Parametermodells

Jahr	Parametermodell	Messpunkte
2000	TMS-Kalibrierung [Leistner, 2000]	632
2007	Lasertracker Kalibrierung [Paffenholz et al., 2007]	436
2009/2014	Erweiterung Lasertracker-Modell [Meiser, 2009]	156 (330)

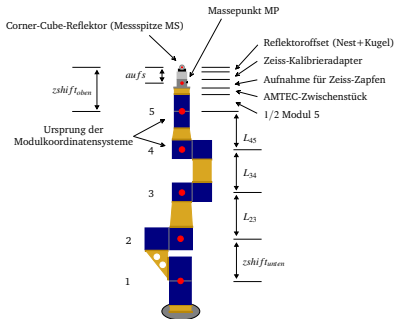
Self-Calibration (Geo++[®])

- ▶ Modell bisher nicht publiziert (gesonderte Modellierung von Lastfallkoeffizienten)

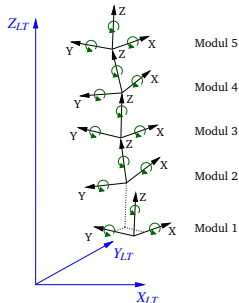
IfE-Modell

- + kein plug&play - (*wissenschaftlicher Ansatz*)
- + vollständiger Zugang zu Kalibrierparametern / Modell
- Laborbedingungen und Lasertracker erforderlich
- sorgfältige Horizontierung während des Roboteraufbaus notwendig

geometrisch-mechanisches Roboter-Parametermodell



(a) Roboterarm MP2 (rev. 1.0)

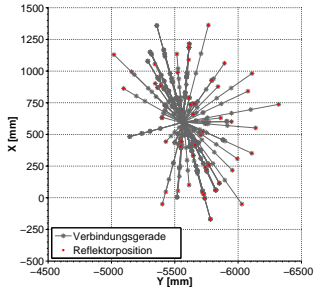


(b) Koordinatentransformationen

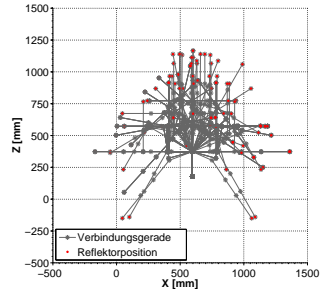
Parametrisierung

- ▶ Modul: individuelle Modul-Koordinatensysteme ($i=5$)
- ▶ Link: Parametrisierung aufeinanderfolgender Module (4) im übergeordneten System (LT. Lasertracker)
- ▶ auszugleichende Parameter: 20 (16) Elemente: Lageoffsets (X_{M_i}), Winkeloffsets (O_{M_i}), Verschiebungen (L_i), Torsion (ω_{M_i} , φ_{M_i} , κ_{M_i}), Drehmomente (k_{M_i})

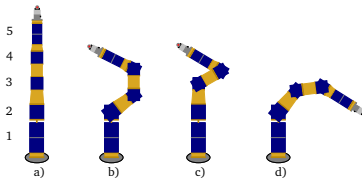
Optimierung der Kalibrierkonfiguration



(a) Draufsicht (X-Y-Ebene)



(b) Seitenansicht (X-Z-Ebene)

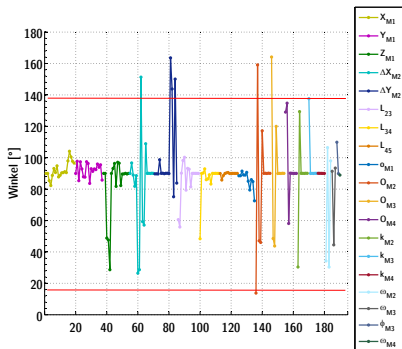


(c)

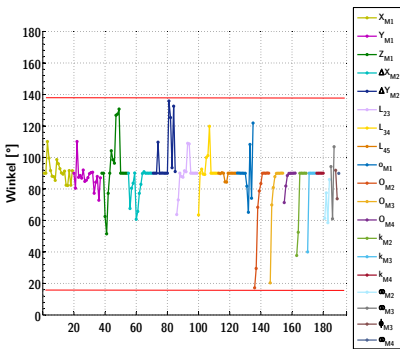
Ziele und Anforderungen

- ▶ globale Abdeckung des Roboter-Arbeitsbereiches gewährleisten
- ▶ signifikante und zuverlässige Parameterbestimmung ermöglichen (inkl. verschiedener Gewichte)
- ▶ Zeitaufwand (Messpunkte) reduzieren

Analyse der optimalen Kalibrierkonfiguration (Designmatrix)



(a) Version 2000 - 2017



(b) Version 2009 - 2014

Abbildung: Winkel der Spaltenvektoren innerhalb der Designmatrix.

Ergebnisse

- ▶ deutliche Reduktion linearer Abhängigkeiten innerhalb der Designmatrix
- ▶ resultierende Abhängigkeiten einiger Parameter verbleiben (indiziert durch Robotergeometrie)

Analyse der optimalen Kalibrierkonfiguration (Designmatrix)

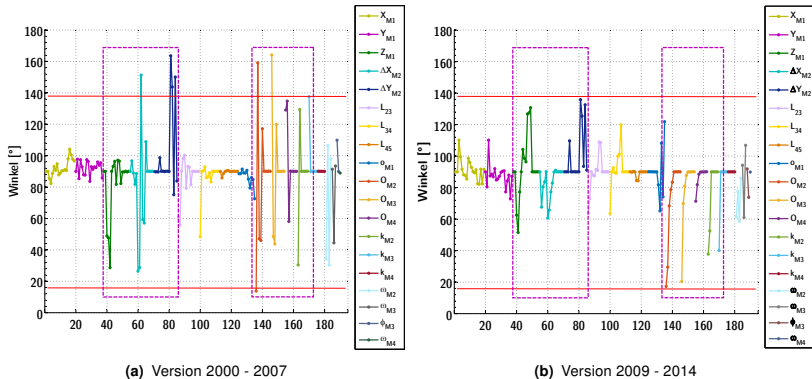


Abbildung: Winkel der Spaltenvektoren innerhalb der Designmatrix.

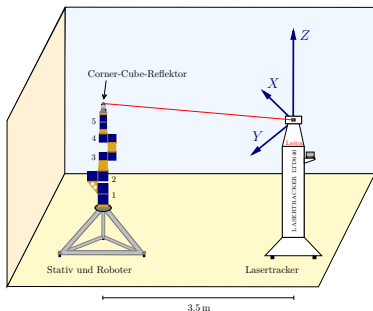
Ergebnisse

- ▶ deutliche Reduktion linearer Abhängigkeiten innerhalb der Designmatrix
- ▶ resultierende Abhängigkeiten einiger Parameter verbleiben (indiziert durch Robotergeometrie)

Lasertrackerkalibrierung - Warum?

Vorteile zur Nutzung eines Lasertrackers

- ▶ Automatisierung und Beschleunigung des Kalibrierablaufs
- ▶ **interferometrische** bzw. ADM¹ Streckenmessung mittels CornerCube (CC)
- ▶ externe / unabhängige Überprüfung der PowerCube-Robotereinheit
- ▶ kinematische Analysen ermöglichen Untersuchungen des Roboter-Bewegungsverhaltens



¹ADM: absolute distance measurement

Parameterschätzung

Ausgleichung

- ▶ nichtlineares AGL-Modell (iterativ, vermittelnde Ausgleichung)
- ▶ Gleichgewichtung der Beobachtungen ($\mathbf{P} \equiv \mathbf{I}$)

Zuverlässigkeitsanalysen der Parameter

- ▶ Datasnooping nach Baarda (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%)
- ▶ Global- und Signifikanztest (χ^2 -, t-Test), Konfidenzbereiche

Berechnungsprogramm

- ▶ benutzerfreundlich (plug&play), matlabbasiert
- ▶ jederzeit Zugang zu allen Prozessebenen
- ▶ verschiedene Postprozessing-Operationen möglich (*rewind calibration*)
- ▶ flexibel: Eingangsdaten anhand unterschiedlicher Parametermodelle auswertbar

Name	altes TMS-Modell 2007		neues LT-Modell				Einheit
	Parameter	$\hat{\sigma}$	2009	$\hat{\sigma}$	2014	$\hat{\sigma}$	
X_{M1}	-	0.0000	-	0.00859	-	0.01773	mm
Y_{M1}	-	0.0900	-	0.00852	-	0.01796	mm
Z_{M1}	-	0.0090	-	0.01555	-	0.03201	mm
ΔX_{M2}	0.35	0.0260	-0.17	0.01201	0.11	0.02510	mm
ΔY_{M2}	0.70	0.0180	1.23	0.01474	-0.91	0.03010	mm
L_{23}	200.08	0.0300	200.22	0.01237	200.16	0.02566	mm
L_{34}	199.86	0.0190	199.98	0.01316	199.99	0.02730	mm
L_{45}	160.17	0.0190	160.16	0.00928	160.11	0.01923	mm
α_{M1}	-	0.0190	-	0.00131	-	0.00277	deg
α_{M2}	-0.505	0.0018	-0.097	0.00285	-0.001	0.00601	deg
α_{M3}	-0.165	0.0034	0.210	0.00452	0.194	0.00946	deg
α_{M4}	-0.863	0.0052	0.031	0.00390	0.034	0.00806	deg
k_{M2}	0.004	0.0040	0.004	0.00007	0.003	0.00013	deg · s ² / (kg · m ²)
k_{M3}	0.004	0.0001	0.003	0.00016	0.003	0.00032	deg · s ² / (kg · m ²)
k_{M4}	0.002	0.0002	0.001	0.00030	0.001	0.00056	deg · s ² / (kg · m ²)
ω_{M2}	-0.002	0.0006	-0.421	0.00159	0.0307	0.00330	deg
ω_{M3}	-0.053	0.0028	0.022	0.00172	0.0374	0.00360	deg
ϕ_{M3}	0.023	0.0020	-0.107	0.00128	-0.0965	0.00272	deg
ω_{M4}	-0.092	0.0023	-0.026	0.00241	-0.0287	0.00498	deg
ϕ_{M4}	-0.029	0.0018	-0.094	0.00189	-0.0956	0.00397	deg
Beobachtungen	436		156		156		
s_0 (a priori)	0.23		0.23		0.23		
\hat{s}_0 (a posteriori)	0.17		0.19		0.20		

Legende

zusätzlich notwendige Parameter

zuverlässige Wiederholbarkeit

schwach signifikant

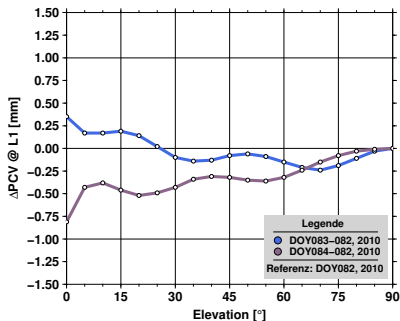
signifikante Änderungen

Fazit und Ergebnis der Optimierung und Kalibrierung

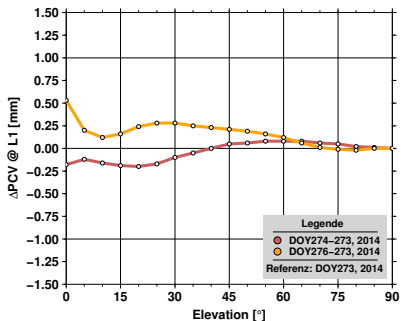
individuelle Kalibrierung einer Leica/Trimble GNSS Antenne (Dorne/Margolin)

März 2010

Oktober 2014



(a) GPS L1, LEIAR25.R3 LEIT



(b) GPS L1, TRM59800-00 SCIS

Abbildung: Wiederholbarkeiten individueller Kalibrierungen mit Unsicherheit $\sigma=0.5$ mm.

Regelmäßige Kalibrierungen der Kalibriereinrichtung

Eine sorgfältige Maschinenkalibrierung stellt sicher, dass Qualitätsstandards eingehalten und die hohe Präzision der Einrichtung überhaupt zur Verfügung gestellt werden kann.

Zusammenfassung

Erweiterung des Parametermodells

- ▶ Reduktion vorhandener Korrelationen um 50 %
- ▶ Reduktion der Höhe vorhandener Korrelationen um bis zu 20 %
- ▶ Optimierung der Kondition um 2.5 %

Ergebnis der Roboterkalibrierung

- ▶ hohe Konsistenz des Robotersystems (geometrischen Modells)
- ▶ Positionsgenauigkeit und Präzision auf 0.25 mm nachweislich erreichbar und bestimmbar (auch nach 14 Jahren Dienst im Außenbereich)
- ▶ Änderungen durch Ersatzmodule können erheblichen Einfluss nehmen (Revision, Unterlegscheiben etc.)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Tobias Kersten & Steffen Schön
Institut für Erdmessung

Schneiderberg 50

D-30167 Hannover, Germany

phone + 49 - 511 - 762 5711

fax + 49 - 511 - 762 4006

web <http://www.ife.uni-hannover.de>

mail kersten@ife.uni-hannover.de



Leibniz Universität Hannover
Institut für Erdmessung

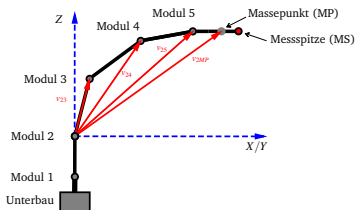
Danksagung

Diese Arbeiten wurden in Kooperation mit dem Geodätischen Institut Hannover (GIH) durchgeführt. Die Autoren danken besonders *Dipl.-Ing. Meiser* und *Dr.-Ing. Paffenholz* für die präzisen und soliden Vorarbeiten und erfolgreiche stete Kooperation.

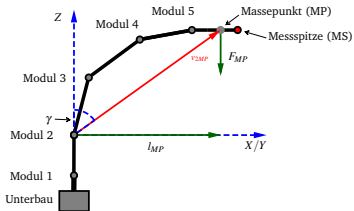
Literatur

-  **Chen, T., HU, Z., und Li, T. (2013).** Experimental Studies of precise Calibration of GPS Antenna Phase Center Variation. *Seismology and Geology*, 35(2):380–387. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2013.02.016.
-  **Geo++ (2013).** GNSMART Online-Hilfe. *Handbuch zum GNSMART-Programmpaket*, Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH.
-  **Leistner, H. (2000).** Roboterkalibrierung - Funktionales Modell. *Technischer Bericht*, Institut für Erdmessung (IfE), Leibniz Universität Hannover.
-  **Meiser, V. (2009).** Kalibrierung des GNSS-Antennenkalibrierroboters des Institut für Erdmessung mittels Lasertracking. *Technischer Bericht*, Geodätisches Institut Hannover (GIH), Leibniz Universität Hannover.
-  **Menge, F. (2003).** Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. Diss., Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 247.
-  **Paffenholz, J.-A., Bielenberg, O., Neuner, H., Schön, S., und Kutterer, H. (2007).** Neukalibrierung des IfE-Roboters mittels Lasertracking. In *Geodätische Woche 2007, 26.09., Leipzig, Deutschland*. Poster.
-  **Schunk (2011).** Servoelektrische Schwenkeinheit Typ PR70-110 - Montage und Betriebsanleitung. *Schunk Manuals*.
-  **Seeber, G. und Böder, V. (2002).** Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur hochpräzisen Kalibrierung von GPS Antennenaufstellungen - Schlussbericht zum BMBF/DLR Vorhaben 50NA9809/8. *Institut für Erdmessung*.

Details - Lastfallkoeffizienten



(a) Teildrehmomente



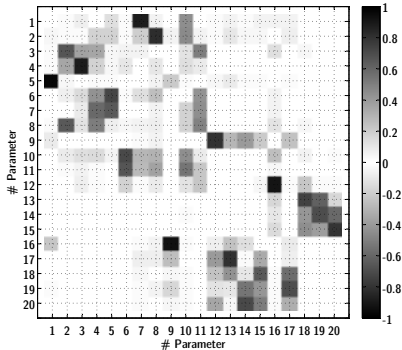
(b) resultierendes Drehmoment

Abbildung: Parametrisierung der Lastfallkoeffizienten, [Meiser, 2009].

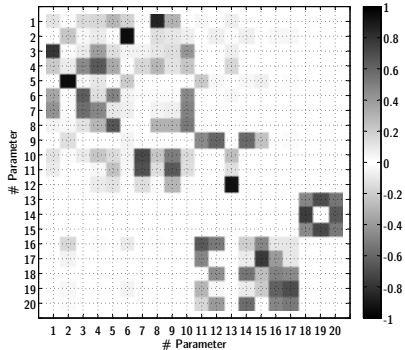
Lastfallkoeffizienten

- ▶ **alt:** Koordinaten der Modulmittelpunkte über einfache Winkelsummation (Drehwinkeländerung durch unterschiedliche Lasten)
- ▶ **neu:** Berechnung über exakte Transformationen (initial ohne Drehmoment, iterativ)
- ▶ Verbindungsvektoren aus Teildrehmomenten (Modulgewichte, Hebelarm, Drehmoment)

Korrelationsanalyse mit Eigenvektoren und Eigenwerten



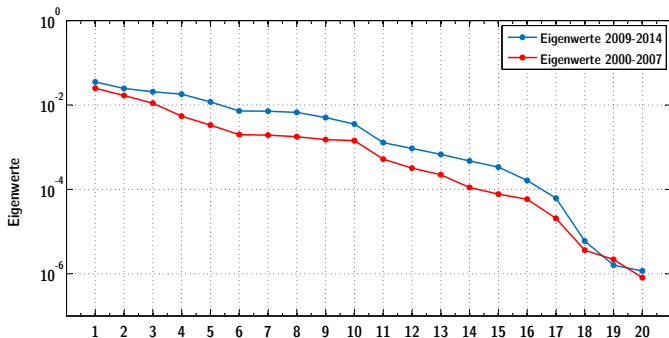
(a) Modell: 2000 - 2007



(b) Modell: 2009 - 2014

Abbildung: Eigenvektoren der Kofaktorenmatrix der Unbekannten Q_{xx}

Korrelationsanalyse mit Eigenvektoren und Eigenwerten



Ergebnisse

- ▶ Analyse von Eigenvektoren und Eigenwerten (aus Linearkombinationen der zu schätzenden Parameter)
- ▶ Trennung hoch-korrelierter Parameter erfolgreich (**Reduktion der Anzahl um 50%**)
- ▶ Verbesserung der Kondition des Gesamtsystems um 2.5%
- ▶ geringe Abhängigkeiten bleiben bestehen

Korrelationen der Parametermodelle

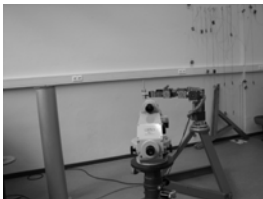
Parameter 1	Parameter 2	Kalibriermessung	
		2009 / 2014	2007
		Korrelation	Korrelation
		[%]	[%]
O_{M2}	O_{M3}	-71.3	-73.8
O_{M3}	O_{M4}	-67.9	61.2
k_{M2}	k_{M3}	-62.9	-54.6
k_{M3}	k_{M4}	-57.5	-56.6
L_{23}	k_{M2}	-56.7	-81.8
ΔY_{M2}	ω_{M2}	-	75.9
L_{34}	k_{M3}	-	-71.4
L_{34}	k_{M4}	-	62.1
L_{45}	k_{M4}	-	-59.6
Z_{M1}	L_{45}	-	-57.1

[Meiser, 2009]

Kalibrierung 2014 nach Revision

wissenschaftliche Roboterkalibrierung 2014

- ▶ 2 Arbeitskräfte, 2 Werktage
- ▶ 3 Sätze (156 Punkte)
- ▶ inklusive Auf- und Abbau des vollständigen Robotersystems (Pfeiler Labornetz und GIH-Labor)



Konsistenz individueller GNSS-Antennenkalibrierungen

- ▶ hohe Konsistenz der Roboter-Parameter garantiert zuverlässige PCO+PCV Schätzung
- ▶ Abweichungen der Antennenkalibrierungen mit Unsicherheit von 0.5 mm [Menge, 2003]