

Regelung eines Brückenkrans

Version vom
18. Februar 2019

Teil des Praktikums Regelungstechnik (PRT)



Fachgebietsleiter

Prof. Dr.-Ing. O. Stursberg
stursberg@uni-kassel.de

Außerplanmäßiger Professor

Prof. Dr. rer. nat. A. Linnemann
linnemann@uni-kassel.de

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsaufbau	4
2	Bediensoftware	5
3	Vorbereitungsfragen	8
4	Versuchsdurchführung	9
4.1	Initialisierung des Systems	9
4.2	Bedienung des Versuchsaufbaus	9
4.3	Regelung der Wagenposition y_w	10
4.4	Zusätzliche Regelung des Winkels α	11
4.5	Digitale PD-Regelung von y_w und α	12
4.6	Regelung mit zusätzlicher Stellgrößenbeschränkung	12
4.7	Regelung der x- und y-Achse	13

Sicherheitshinweise

- Der Kran darf nur von Personen mit tätigkeitsbezogener Unterweisung oder Praktikumsteilnehmern unter entsprechender Aufsicht betrieben werden.
- Eine Inbetriebnahme des Krans darf nur erfolgen, wenn der Zugfaden der Kranlast (schwarzes Gewicht) keine Beschädigungen aufweist und das Gewicht sicher am Zugfaden befestigt ist. (Vorher prüfen!)
- Vor jeder Inbetriebnahme sind die Zahnriemen der x- und y-Antriebe auf ausreichende Spannung zu überprüfen. Gegebenenfalls sind diese nach zu spannen.
- Vor Versuchsaufnahme hat sich die bedienende Person über die Position des versuchseigenen NOT-AUS Schalters zu informieren.
- Der Versuch ist nur am zugehörigen Leistungsteil ein- bzw. auszuschalten.
- Während eines laufenden Versuchs darf sich keine Person im Pendelbereich des Kran-Gewichts aufhalten; ein Hineingehen bzw. Hineingreifen in das System ist untersagt. Die vorhandene Absperrung ist ggf. zu errichten und zu beachten.

Literatur

- [1] C. Woernle (2016): *Mehrkörpersysteme: eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper*, Springer-Verlag.

1 Versuchsaufbau

Der Versuch behandelt die Regelung eines Brückenkrans, wie er z.B. bei der Be- und Entladung von Containerschiffen genutzt wird. Brückenkräne bilden in Transportprozessen meist den Flaschenhals, weshalb eine geeignete Regelung und die damit verbundene Zeitersparnis in der Praxis von großer Bedeutung ist. Das Ziel des Praktikums liegt darin, die zum Transport der Last benötigte Zeit und gleichzeitig das Schwingen der Last zu verringern, um einen wirtschaftlicheren und sichereren Transportprozess zu erreichen.

Der Kran besteht aus einer Schiene (blau), die entlang der x-Achse bewegt werden kann, einem auf der Schiene entlang der y-Achse beweglichen Wagen (rot) sowie einer in z-Richtung beweglichen Last an einem Seil der Länge R , die am Wagen befestigt ist (vgl. Abbildung 1).

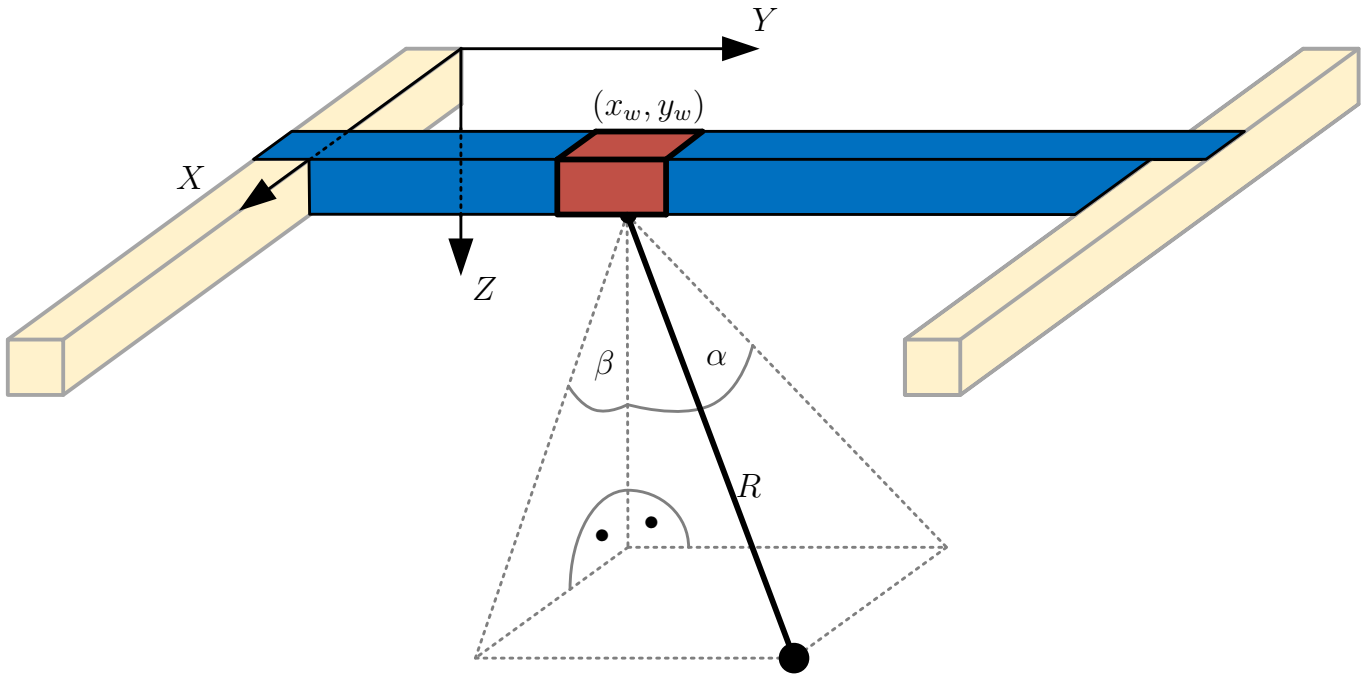


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit wichtigen Bezeichnungen

Beim Bewegen des Wagens bzw. der Schiene beginnt die Last am Ende des Seils zu pendeln. Um das Pendeln zu messen stehen Sensoren zur Verfügung, die die Winkel der Seilauslenkungen α und β gegenüber dem Lot messen. Im folgenden Versuch soll die Position des Wagens (x_w, y_w) sowie die Winkel (α, β) bei konstanter Seillänge R geregelt werden, sodass die angehängte Last möglichst schnell und mit möglichst geringem Pendeln verfahren werden kann. Zusätzlich zu der Wagenposition und den Seilwinkeln wird der gesamte Zustand des Krans durch die zeitlichen Änderungen der Positionen und Winkel beschrieben:

$$[y_w \quad \dot{y}_w \quad \alpha \quad \dot{\alpha} \quad x_w \quad \dot{x}_w \quad \beta \quad \dot{\beta}].$$

Zur Bewegung der Schiene und des Wagens stehen die mechanisch beschränkten Stellsignale:

$$u_x, u_y \in [-1, 1]$$

zur Verfügung. Die Stellsignale werden von MATLAB über ein Leistungsteil an zwei Gleichstrommotoren übergeben. Gleichzeitig werden von den Sensoren am Kran die Wagenpositionen und Seilwinkel erfasst und über das Leistungsteil an MATLAB übermittelt. Die Ableitungen von Positionen und

Winkeln können nicht direkt gemessen werden. Die Messgenauigkeit für die Wagenposition liegt bei ca. $60\mu\text{m}$ und die der Winkel bei 0.0015 rad . Die Regelung in MATLAB findet mit einer Abtastzeit von $T_S = 10\text{ ms}$ statt.

2 Bediensoftware

Grundlegende BediENAufgaben können mittels einer vom Hersteller zur Verfügung gestellten Software durchgeführt werden, die direkt in MATLAB-Simulink integriert ist (vgl. Abbildung 2). Die Software lässt sich durch Eingeben von `cr` in das Command-Window von MATLAB öffnen und durch doppelklicken der Schaltflächen benutzen.

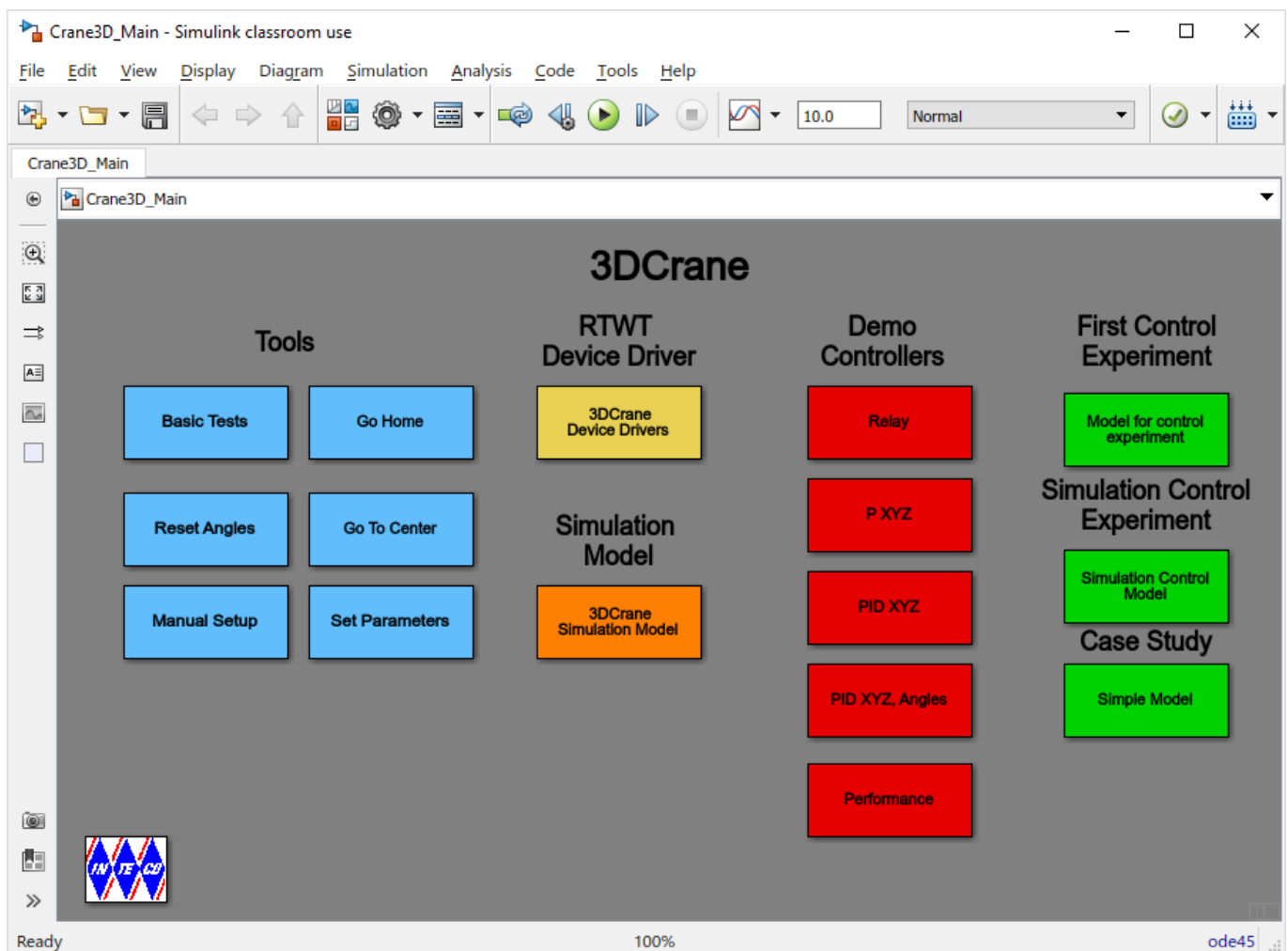
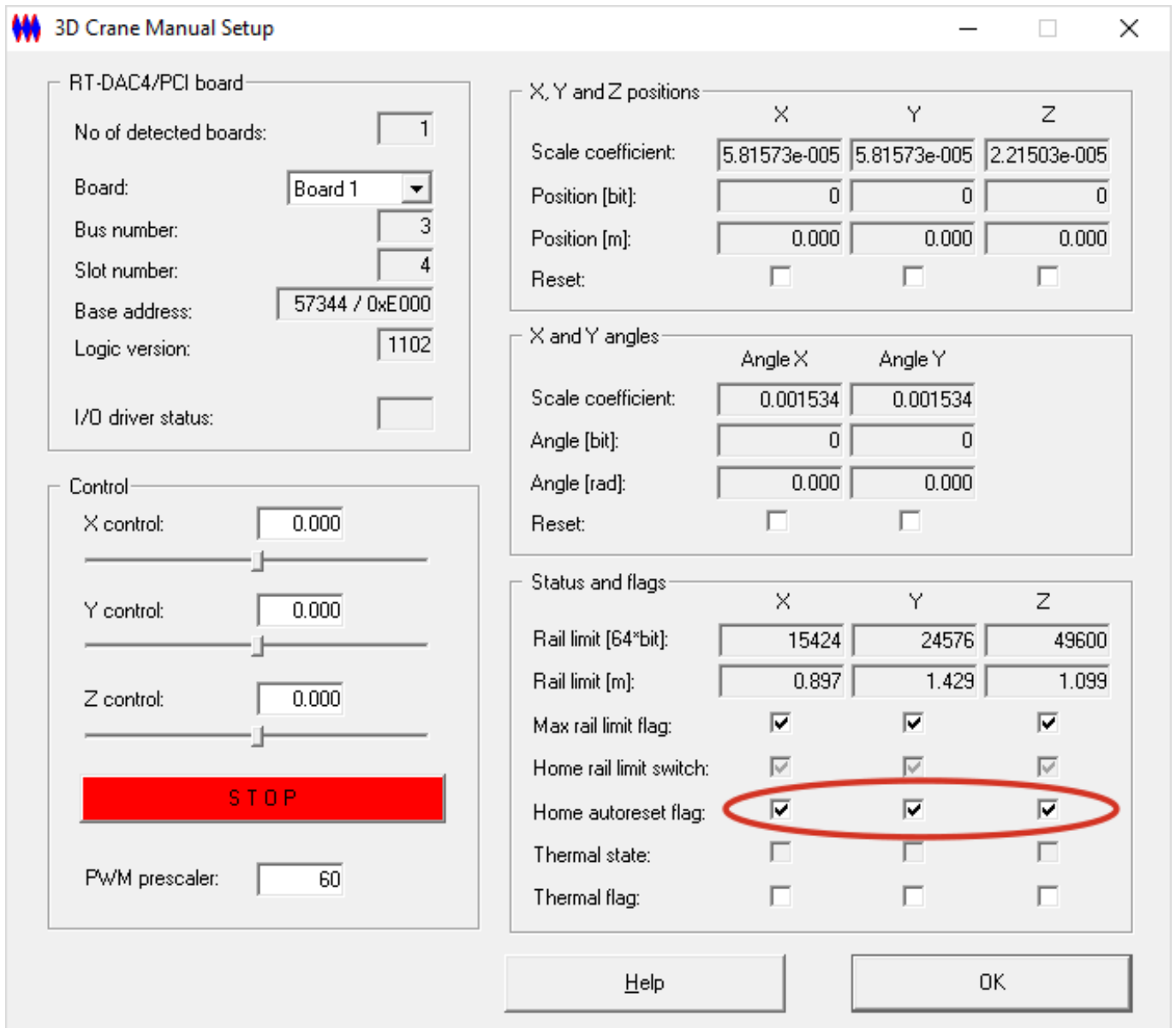


Abbildung 2: Bedienoberfläche des Krans

Für die Versuchsdurchführung sind insbesondere die Tools *Go Home*, *Go To Center* und *Manual Setup* relevant:

- Go Home:* Der Kran fährt zum Ursprung (siehe Abbildung 1).
- Go To Center:* Der Kran fährt die jeweiligen mittleren Positionen von x_w , y_w und R an.
- Manual Setup:* Über das Tool können die aktuellen Positionen und Winkel abgelesen und ggf. zurückgesetzt werden. Außerdem kann hierüber der Kran in die jeweiligen Richtungen manuell verfahren werden (vgl. Abbildung 3).



The image shows a software window titled "3D Crane Manual Setup". It contains several configuration panels. On the left, the "RT-DAC4/PCI board" panel shows detected hardware details. Below it, the "Control" panel features sliders for X, Y, and Z control, a red "STOP" button, and a PWM prescaler. On the right, the "X, Y and Z positions" panel sets scale coefficients and positions. Below that, the "X and Y angles" panel sets angle scale coefficients. The "Status and flags" panel at the bottom right contains a table of status flags, with the "Home autoreset flag" row circled in red. At the bottom are "Help" and "OK" buttons.

RT-DAC4/PCI board

No of detected boards: 1

Board: Board 1

Bus number: 3

Slot number: 4

Base address: 57344 / 0xE000

Logic version: 1102

I/O driver status: ☐

Control

X control: 0.000

Y control: 0.000

Z control: 0.000

STOP

PwM prescaler: 60

X, Y and Z positions

	X	Y	Z
Scale coefficient:	5.81573e-005	5.81573e-005	2.21503e-005
Position [bit]:	0	0	0
Position [m]:	0.000	0.000	0.000
Reset:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

X and Y angles

	Angle X	Angle Y
Scale coefficient:	0.001534	0.001534
Angle [bit]:	0	0
Angle [rad]:	0.000	0.000
Reset:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Status and flags

	X	Y	Z
Rail limit [64*bit]:	15424	24576	49600
Rail limit [m]:	0.897	1.429	1.099
Max rail limit flag:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Home rail limit switch:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Home autoreset flag:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Thermal state:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Thermal flag:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Help OK

Abbildung 3: Bedienoberfläche *Manual Setup*

Vor jeder Versuchsdurchführung müssen die drei Häkchen *Home autoreset flag* (roter Kreis) manuell gesetzt werden.

Simulink-Modell

Für Aufgaben, die über das manuelle Bedienen des Krans hinaus gehen, steht Ihnen ein Simulink-Modell zur Verfügung. Dieses ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Kernstück des Modells bildet der

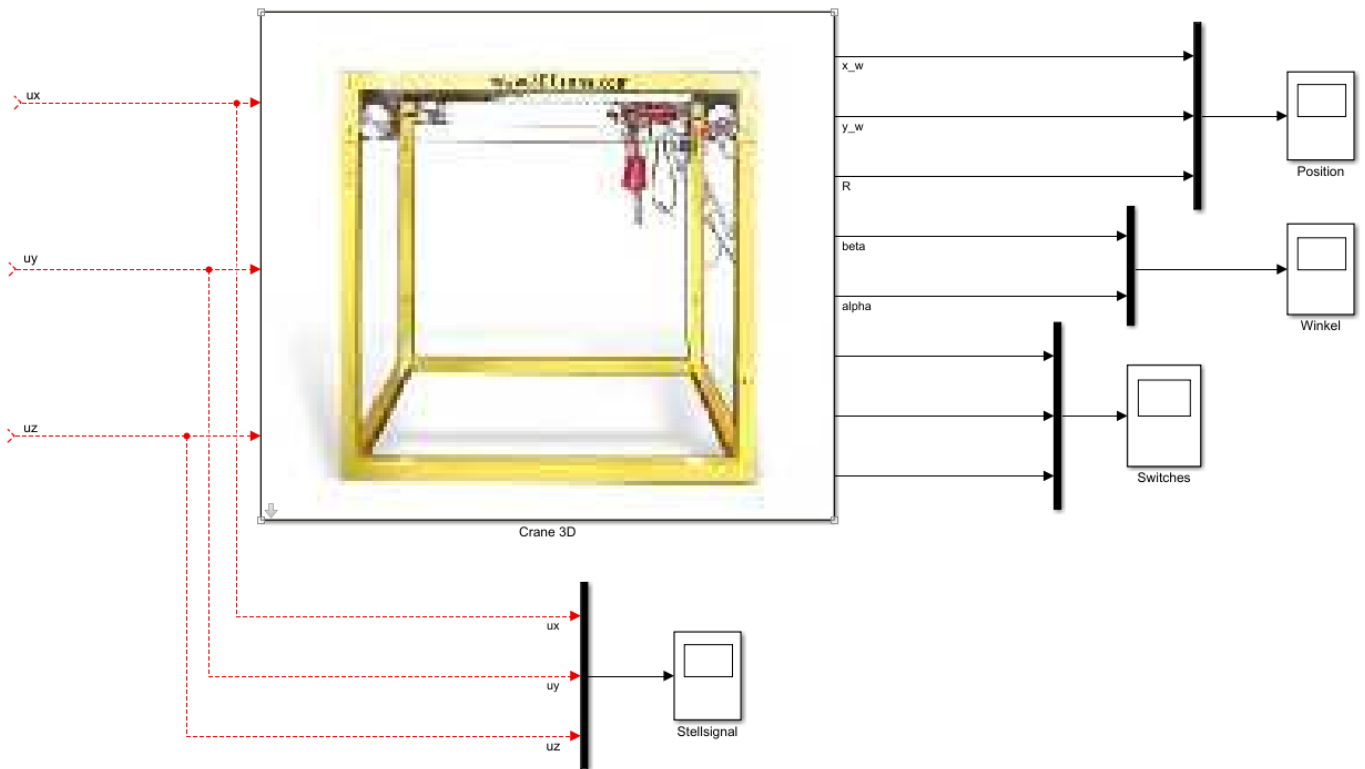


Abbildung 4: Simulink-Modell zur Ansteuerung des Krans

Block „Crane 3D“. In diesem ist die Verbindung zum Leistungsteil des Krans parametrisiert, sodass Simulink direkt auf den Kran zugreifen kann. Auf der linken Seite stehen alle System-Eingänge und auf der rechten Seite alle System-Ausgänge zur Verfügung. Die Eingänge sind dabei die Stellsignale u_x , u_y und u_z , wobei u_z zur Regelung der Seillänge R vorgesehen ist und in diesem Versuch nicht weiter betrachtet wird. Innerhalb des Crane 3D-Blocks ist jeweils eine Sättigung für die Eingangssignale integriert, sodass Stellsignale $|u| > 1$ keinen Schaden anrichten können. Auf der Ausgangsseite liefert der Kran die Wagenposition (x_w und y_w in $[m]$), die Seillänge (R in $[m]$), die Winkel (α und β in $[rad]$) sowie Auskunft über die Endlagerschalter (Signalzustand 0: Endlage erreicht; Signalzustand 1: Endlage nicht erreicht). Zu beachten ist hierbei, dass lediglich auf der Seite des Ursprungs mechanische Endlagerschalter angebracht sind und daher nur dort die Endlagen abgefragt werden können. Auf der jeweils anderen Seite sind softwareseitig Endlagen eingestellt, sodass der Wagen zwar am Ende des Krans gestoppt wird, das tatsächliche Erreichen der Endlage aber nicht angezeigt werden kann.

3 Vorbereitungsfragen

- (a) Aus dem Lagrange-Formalismus [1] für das 1-dimensionale System (Bewegung ausschließlich in y-Richtung möglich) ergeben sich der folgende Zustandsvektor und Differenzialgleichungen:

$$x = \begin{bmatrix} y_w & \dot{y}_w & \alpha & \dot{\alpha} \end{bmatrix}^T$$

$$y = \begin{bmatrix} y_w \\ \alpha \end{bmatrix}$$

$$\ddot{y}_w(t) = \frac{Rm_c \sin(\alpha(t))\dot{\alpha}(t)^2 + k_y(t) + gm_c \cos(\alpha(t)) \sin(\alpha(t))}{m_c \sin^2(\alpha(t)) + m_w}$$

$$\ddot{\alpha}(t) = -\frac{Rm_c \cos(\alpha(t)) \sin(\alpha(t))\dot{\alpha}(t)^2 + k_y(t) \cos(\alpha(t)) + g \sin(\alpha(t))(m_c + m_w)}{R(m_c \sin^2(\alpha(t)) + m_w)}$$

mit

$$k_y(t) = k_{f,y} \cdot u_y(t) - k_{v,y} \cdot \dot{y}_w(t).$$

Nutzen Sie die Ruhelage:

$$x_s = [\bar{y}_w \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, u_s = 0$$

und leiten Sie aus den gegebenen DGL das Zustandsraummodell der Form

$$\dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t)$$

$$\bar{y}(t) = C\bar{x}(t) + D\bar{u}(t)$$

her, wobei \bar{y}_w eine beliebige Position ist.

Setzen Sie nach der allgemeinen Herleitung die folgenden Konstanten ein:

$$k_{v,y} = 50, k_{f,y} = 17.6, m_w = 1.03, m_c = 0.481, R = 0.5, g = 9.81$$

- (b) In der Vorlesung *Grundlagen der Regelungstechnik* sind die Übertragungsfunktionen eines idealen PD-Reglers und eines PT1-Gliedes durch:

$$G_R(s) = K_P + K_D \cdot s = K_P \cdot (1 + s \cdot T_D)$$

$$G_{PT1}(s) = \frac{K}{1 + s \cdot T}$$

gegeben. Diskretisieren Sie die Übertragungsfunktionen in die Form:

$$y(t_k) = f_R(u(t_k), u(t_{k-1}), K_P, T_D, T_S)$$

$$y(t_k) = f_{PT1}(y(t_{k-1}), u(t_k), K, T, T_S)$$

- (c) Implementieren Sie das linearisierte Modell, den PD-Regler sowie das Filter in jeweils eigene Subsysteme in Simulink. Benutzen Sie die in Teilaufgabe (b) bestimmten Differenzengleichungen. Bringen Sie die Subsysteme für die Versuchsdurchführung in digitaler Form mit.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Initialisierung des Systems

Bevor Sie mit der eigentlichen Versuchsdurchführung starten, müssen zum Start und zur Initialisierung des Systems die folgenden Schritte durchgeführt werden:

1. Stellen Sie sicher, dass der Not-Aus nicht gedrückt ist.
2. Schalten Sie das Leistungsteil ein (die blaue LED sollte nun leuchten).
3. Aktivieren Sie das Leistungsteil durch Drücken des roten Tasters an der Vorderseite des Leistungsteils (die rote LED sollte nun leuchten).
4. Starten Sie die Bedienoberfläche des Krans durch Eingeben von `cr` im MATLAB Command-Window.
5. Starten Sie das Tool *Go Home*. Der Kran sollte nun zum Koordinatenursprung des Krans fahren und die Endschalter kalibrieren.
6. Starten Sie das Tool *Manual Setup*. Hier können Sie nun die aktuellen Koordinaten des Krans, die Winkel sowie die Zustände der Endschalter ablesen. Sollten die Werte für $X = x_w$, $Y = y_w$ und $Z = R$ jeweils $\neq 0$ sein, aktivieren Sie jeweiligen Kontrollkästchen zum Zurücksetzen. Sobald die Werte auf 0 gesetzt sind, klicken Sie erneut auf die Kontrollkästchen, um sie zu deaktivieren. Aktivieren Sie zudem die Kästchen *Home autoreset flag*, um das korrekte Zurücksetzen der Positionen beim Erreichen der Endschalter sicherzustellen.
7. Stellen Sie sicher, dass sich die an das Seil angehängte Last in Ruhe befindet (beachten Sie hierbei unbedingt die Sicherheitshinweise von Seite 3!). Sollten die angezeigten Werte für *Angle X* = β und *Angle Y* = α jeweils $\neq 0$ sein, so setzen Sie auch die Winkel wie im vorherigen Schritt zurück.
8. Stellen Sie sicher, dass die Softwareendschalter (*Rail limit*) korrekt eingestellt sind. Vergleichen Sie hierzu die Werte in Abbildung 3. Sollten die Werte inkorrekt sein, öffnen Sie das Tool *Set Parameters*, geben dort die angegebenen Werte ein und schließen den Vorgang durch Klicken von *Update* ab.

4.2 Bedienung des Versuchsaufbaus

Machen Sie sich mit der Bedienung des Systems vertraut, indem Sie den Kran manuell mit Hilfe des Tools *Manual Setup* verfahren. Nutzen Sie die Schieberegler, um verschiedene Stellsignale aufzuprängen und achten Sie auf das Verhalten des Krans. Versuchen Sie auch, den Wagen entlang der y-Achse zu fahren und das Gewicht am Ende des Seils auszuregeln. Fahren Sie hierfür das Gewicht z.B. auf eine Position von 0.5 m.

Hinweis: Je nach Bedienweise kann die Last den Arbeitsbereich des Kran verlassen. Beginnen Sie also unbedingt zunächst mit geringen Stellgrößen, um ein Gefühl für das Verhalten des Krans zu bekommen!

Für die weitere Versuchsbearbeitung steht Ihnen das MATLAB-Skript `KranAufgaben.m` zur Verfügung, in das alle benötigten Parameter eingetragen werden sollen. Über das Skript wird auch das jeweilige Simulink-Modell gestartet und es werden automatisch Grafiken für die messbaren Zustände sowie die Stellsignale erstellt. Für die einzelnen Teilaufgaben werden:

- Per *Manual Setup* die gewünschten Startpositionen eingestellt und die *Home autoreset flags* gesetzt,
- der jeweilige Name des benutzen Simulink-Files in das Skript `KranAufgaben.m` in Zeile 7 eingetragen (Syntax: `KranAufgX`, $X \in \{3 \dots 7\}$),
- Zeilen mit benötigten Parametern einkommentiert, und
- das Skript ausgeführt.

Anschließend sollten Sie sich alle wichtigen Informationen (Bilder von Regelungsergebnissen) für Ihre Dokumentation abspeichern.

4.3 Regelung der Wagenposition y_w

In dieser Aufgabe soll eine Regelung der Wagenposition y_w implementiert werden.

- Fahren Sie den Kran auf die mittlere Position für x_w und auf Null für y_w . Stellen Sie für die Länge R ebenfalls die mittlere Position ein (bleibt konstant für den gesamten restlichen Versuch). Welche Möglichkeiten haben Sie hierfür?
- Messen Sie die Haftreibung des Systems: Wie groß muss u_y sein, bis sich der Wagen bewegt?
- Für die Positionsregelung soll ein Regler der Form

$$u_y = R_y(\bar{y}_w - y_w).$$

verwendet werden. Überlegen Sie, wie groß R_y mindestens sein muss, damit ein Regelfehler von 2 cm zu einer ausgleichenden Bewegung des Wagens führt.

- Überlegen Sie, ab welchem Regelfehler das Stellsignal für $R_y = 5$ die Sättigung erreicht.
- Implementieren Sie den Regler in das Simulink-File und führen Sie Experimente mit den nachfolgenden Parameterkonfigurationen durch. Interpretieren Sie die Ergebnisse:

- $R_y = 5$, $\bar{y}_w - y_w(0) = 0.2$
- $R_y = 5$, $\bar{y}_w - y_w(0) = 1$
- $R_y = 1.5$, $\bar{y}_w - y_w(0) = 1$

Notieren Sie außerdem, wie lange die Last noch schwingt, nachdem der Wagen zum Stehen gekommen ist.

4.4 Zusätzliche Regelung des Winkels α

Neben der Ausregelung der Wagenposition y_w soll nun auch der Winkel α geregelt werden. Für die Aufgabenteile (a)-(f) sind das MATLAB-File `KranAufg3.m` sowie das Simulink-Modell `KranAufg3_Simulation.slx` zu verwenden.

- (a) Diskutieren Sie die Reglerstruktur in Abbildung 5.

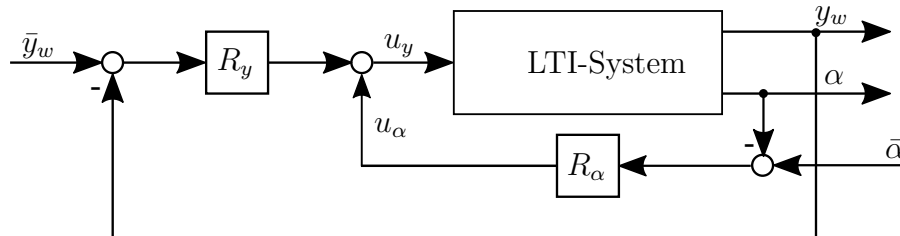


Abbildung 5: Reglerstruktur für Aufgabenteil 4.4.

- (b) Nutzen Sie das linearisierte System aus Vorbereitungsaufgabe (a) und bestimmen Sie in Simulink das Zustandsmodell des Regelkreises aus Abbildung 5, aufgetrennt bei R_α . Das Zustandsmodell soll den Eingang u_α und den Ausgang α haben. Nehmen Sie dafür $R_y = 5$, $\bar{y}_w = 0$ und $\bar{\alpha} = 0$ an.
- (c) Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion und die Pole des zuvor berechneten Zustandsmodells des Regelkreises mit MATLAB. Welche Pole lassen sich der Last zuordnen, welche dem Wagen? Wie lang dauert damit der Einschwingvorgang des Pendels mindestens?
- (d) Überlegen Sie sich anhand der klassifizierten Pole eine sinnvolle Einschwingzeit für das geregelte System. Welche gewünschten Realteile der Pole für die Last ergeben sich aus Ihrer Überlegung?
- (e) Legen Sie mit Hilfe vom SISOTOOL und der Wurzelortskurve den Reglerparameter R_α fest. Welche Pole des geschlossenen Regelkreises erhalten Sie mit Ihrer Wahl? (Hinweis: Achten Sie auf die Struktur der in (c) bestimmten Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises.)
- (f) Simulieren Sie das geregelte System gemäß Abbildung 5 mit dem von Ihnen festgelegten Reglerparameter R_α und $\bar{y}_w = 1$.
- (g) Implementieren Sie die Reglerstruktur nach Abbildung 5 am realen System (in `KranAufg3.slx`) und führen Sie Experimente mit dem System durch. Beobachten Sie, wie der Wagen die Pendelbewegung der Last dämpft. Inwieweit hat sich das Regelverhalten im Vergleich zu den vorherigen Experimenten verändert? Gehen Sie insbesondere auf die verbesserte Einschwingzeit der Last ein.
- (h) Vergleichen Sie den Verlauf von α aus der Simulation mit dem des realen Systems. Wodurch lassen sich die starken Abweichungen erklären, bzw. was wurde in der Simulation nicht berücksichtigt?

4.5 Digitale PD-Regelung von y_w und α

In den bisherigen Aufgaben wurde angenommen, dass die Regelung zeitkontinuierlich stattfindet. In dieser Aufgabe soll demgegenüber der Effekt der im Versuch auftretenden Abtastzeit genauer untersucht werden.

- Untersuchen Sie den Effekt der Abtastzeit auf die Regelung, indem Sie die Abtastzeit des Versuchs über die Variable T_S im Bereich $1 \text{ ms} \leq T_S \leq 200 \text{ ms}$ variieren.
- Erweitern Sie die P-Regler aus der Reglerstruktur aus Abbildung 5 um D-Anteile, sodass R_y und R_α jeweils als PD-Regler implementiert werden. Nutzen Sie für die Implementierung Ihre Ergebnisse aus Vorbereitungsaufgabe (b) sowie die Parameterwerte $K_{P,y} = 3.8$, $T_{D,y} = 0.3$, $K_{P,\alpha} = -10.3$ und $T_{D,\alpha} = 0.09$. Warum ist die Verwendung von PD-Reglern in dieser Anwendung sinnvoll?
- Führen Sie einen Test am realen System mit dem neuen Regler durch und diskutieren Sie das Ergebnis. Setzen Sie dafür die Abtastzeit wieder auf $T_S = 10 \text{ ms}$.
- Nutzen Sie das zeitdiskrete PT1-Glied aus Vorbereitungsaufgabe (c) mit $T = 0.45$ und $K = 1$ zur Filterung des Rauschens. Implementieren Sie das Filter zur Rauschunterdrückung des gemessenen Winkels α . Wird das Rauschen tatsächlich unterdrückt? Welchen Einfluss hat das Filter auf das Regelungsergebnis?

4.6 Regelung mit zusätzlicher Stellgrößenbeschränkung

Bei der bisherigen Implementierung besteht das Problem, dass sich das Stellsignal durch den anfangs großen Regelfehler der Wagenposition über einen langen Zeitraum in der Sättigung befindet. Dies hat zur Folge, dass der Regler für den Winkel α während dieser Phase keine „Freiheit“ hat, um korrigierend auf das System einzuwirken. Dieses Problem soll im Folgenden behoben werden.

- Diskutieren Sie das in Abbildung 6 gegebene Blockschaltbild und erläutern Sie, wie durch die neue Struktur das zuvor beschriebene Problem behoben wird.

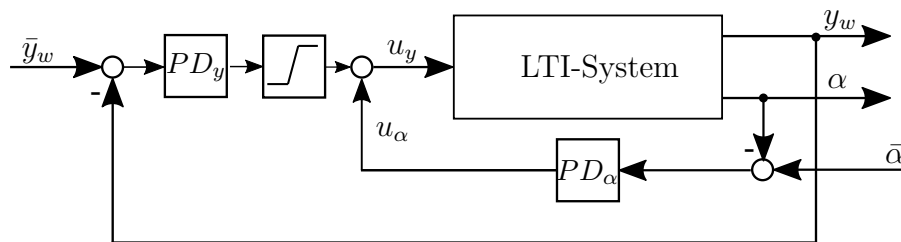


Abbildung 6: Neue Regelstruktur zur verbesserten Regelung von α

- Testen Sie die neue Struktur am realen System und finden Sie eine geeignete Parametrierung der Stellgrößenbeschränkung.

4.7 Regelung der x- und y-Achse

Neben der y-Achse soll im Folgenden auch die x-Achse des Krans geregelt werden. Dazu gehört auch, dass im folgenden neben dem Winkel α der Winkel β betrachtet wird.

- (a) Verwenden Sie für die Regelung von x_w sowie β die Regler, die Sie zuvor auch zur Regelung von y_w bzw. α verwendet haben. Implementieren Sie den Regler für die x-Achse direkt für das reale System und benutzen Sie $\bar{x}_w = 0.5$ und $x_w(0) = 0$.
(Hinweis: Erzeugen Sie sich ein Subsystem von dem bis dato aufgebauten Regler für die y-Achse und kopieren Sie das Subsystem in **KranAufg7.slx** für beide Achsen.)
- (b) Diskutieren Sie das Vorgehen aus Aufgabenteil (a). Schlagen Sie mögliche bessere Strategien zur zusätzlichen Regelung der x-Achse vor.