

Regelung eines Furuta Pendulums

Thomas SCHILDHAUER

Dustin HORENBURG

Kai HAMANN

10. September 2015

Mechatronics Lab

Summer 2015

Advisor: Dipl.-Ing. Martin Gomse

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	4
2.1	Furuta Pendel	4
2.1.1	Annahmen	5
3	Identifikation der Parameter	9
4	Design der Controller	10
4.1	Signalverarbeitung	10
4.2	Swing-Up-Controller	10
4.3	Zweipunktregler	10
4.4	Catcher	11
4.5	Stabilizer	11
5	Ergebnisse	12

1 Einleitung

Diese Dokumentation...

2 Theorie

In diesem Abschnitt wird auf die Theorie des sogenannten *Furuta Pendels* eingegangen. Zunächst wird ein Modell des Pendels beschrieben. Im Anschluss wird die Theorie dieses Modells auf ein echtes Furuta Pendel angewandt.

2.1 Furuta Pendel

Bei dem *Furuta Pendel*, auch drehbares invertiertes Pendel genannt, handelt es sich um ein 1992 von Katsuhisa Furuta entwickeltes mechanisches Pendel. Es besteht aus einem angetriebenen Arm, welcher in der horizontalen Ebene rotieren kann. An diesem Arm ist ein Pendelarm befestigt, welcher frei in der zum angetriebenen Arm orthogonalen Ebene rotiert. Das Furuta Pendel ist ein Beispiel eines komplexen nichtlinearen Oszillators. ?

Antwort auf deine Frage: Lieber in der Einleitung!

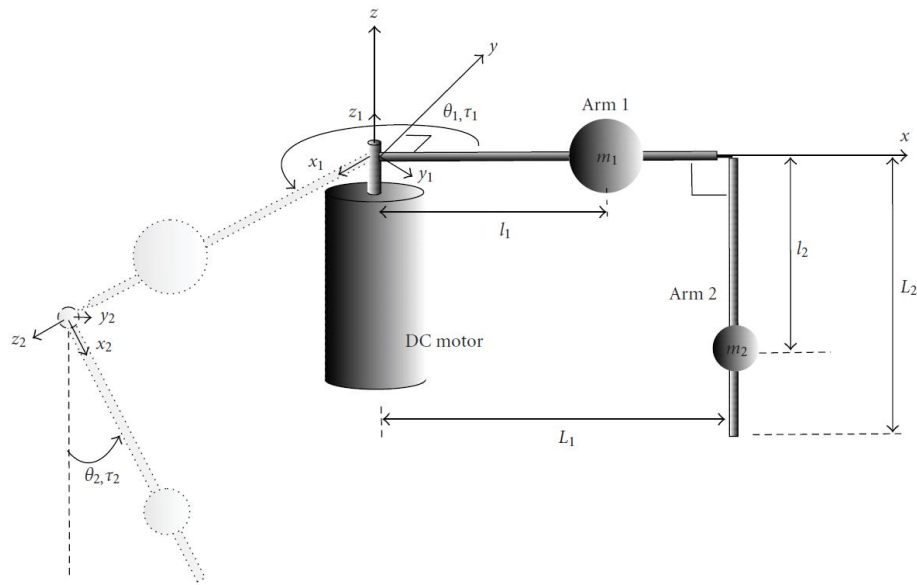


Abbildung 1: Schema des Furuta Pendels nach ?.

Abbildung 2.1 zeigt das Schema eines Furuta Pendels, welches von einem DC-Elektromotor angetrieben wird. Mit dem Motor wird ein Drehmoment τ_1 auf Arm 1 des Pendels gebracht. Das Drehmoment τ_2 bezeichnet das Kopplungsmoment zwischen Arm 1 und Arm 2. Die Verbindung zwischen Arm 1 und Arm 2 rotiert frei und ist nicht angetrieben. Die beiden Arme haben die Längen L_1 und L_2 sowie die Massen m_1 und m_2 . l_1 und l_2 bezeichnen die jeweiligen Abstände der Massenmittelpunkte zum Rotationspunkt der Arme. Die Arme besitzen die Trägheitstensoren J_1 und J_2 um ihren jeweiligen Massenmittelpunkt und ihre Gelenke unterliegen linearer Dämpfung mit den Dämpfungskonstanten b_1 und b_2 .

2.1.1 Annahmen

Vor der Aufstellung des Gleichungssystems werden in ? einige Annahmen getroffen, die an dieser Stelle kurz wiederholt werden:

- a. Die Kopplung zwischen Motorachse und Arm 1 wird als ideal starr angenommen.
- b. Die Motorachse und beide Pendelarme werden als ideal starr angenommen.
- c. Die Koordinatensysteme von Arm 1 und Arm 2 sind die Hauptachsensysteme, sodass die Trgheitstensoren diagonal sind.
- d. Die Trgheit des Motors wird vernachlässigt.
- e. Es wird von reiner linearer (viskoser) Dmpfung ausgegangen.

2.1.2 Formulierung des Problems nach Lagrange

Mit den in Abschnitt 2.1.1 getroffenen Annahmen erhalten wir durch den Ansatz von Lagrange'schen Tensoren die nachfolgenden Formeln ?.

Die potentielle und die kinetische Energie von Arm 1:

$$E_{p1} = 0 \quad E_{k1} = \frac{1}{2}(v_{1c}^T m_1 v_{1c} + \omega_1^T J_1 \omega_1) = \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 (m_1 l_1 + J_{1zz})$$

Die potentielle und kinetische Energie von Arm 2:

$$E_{p2} = g m_2 l_2 (\cos(\theta_2) - 1)$$

$$\begin{aligned} E_{k2} &= \frac{1}{2}(v_{2c}^T m_2 v_{2c} + \omega_2^T J_2 \omega_2) \\ &= \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 (m_2 L_2^2 + (m_2 l_2^2 + J_{2yy}) \sin^2(\theta_2) + J_{2xx} \cos^2(\theta_2)) \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{\theta}_2^2 (J_{2zz} + m_2 l_2^2) + m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

$$L = E_k - E_p \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + b_i \dot{q}_i - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\begin{aligned} &\ddot{\theta}_1 (J_{1zz} + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + (J_{2yy} + m_2 l_2^2) \\ &\times \sin^2(\theta_2) + J_{2xx} \cos^2(\theta_2)) + \ddot{\theta}_2 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \\ &- m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(2\theta_2) \\ &\times (m_2 l_2^2 + J_{2yy} - J_{2xx}) + b_1 \dot{\theta}_1 \end{aligned} \right) \\ \left(\begin{aligned} &\ddot{\theta}_1 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) + \ddot{\theta}_2 (m_2 l_2^2 + J_{2zz}) \\ &+ \frac{1}{2} \dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) (-m_2 l_2^2 - J_{2yy} + J_{2xx}) \\ &+ b_2 \dot{\theta}_2 + g m_2 l_2 \sin(\theta_2) \end{aligned} \right) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
J_1 &= \begin{bmatrix} J_{1xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{1yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{1zz} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 \end{bmatrix} \\
J_2 &= \begin{bmatrix} J_{2xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{2yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{2zz} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\hat{J}_1 &= J_1 + m_1 l_1^2 \\
\hat{J}_2 &= J_2 + m_2 l_2^2 \\
\hat{J}_0 &= J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 (\hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2)) + \ddot{\theta}_2 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \\ -m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \hat{J}_2 \sin(2\theta_2) + b_1 \dot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_1 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) + \ddot{\theta}_2 \hat{J}_2 - \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 \hat{J}_2 \sin(2\theta_2) \\ + b_2 \dot{\theta}_2 + g m_2 l_2 \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \tag{6}$$

Die folgenden Gleichungen enthalten noch den Fehler, den wir finden sollten.

Ich habe die Lsung gerade nicht parat.

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\begin{bmatrix} -\hat{J}_2 b_1 \\ m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) b_2 \\ -\hat{J}_2^2 \sin(2\theta_2) \\ -\frac{1}{2} \hat{J}_2 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \sin(2\theta_2) \\ \hat{J}_2 m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{J}_2 \\ -m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \\ \frac{1}{2} m_2^2 l_2^2 L_1 \sin(2\theta_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ g \end{bmatrix}}{\hat{J}_0 \hat{J}_2 + \hat{J}_2^2 \sin^2(\theta_2) - m_2^2 L_1^2 l_2^2 \cos^2(\theta_2)} \tag{7}$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\begin{bmatrix} m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) b_1 \\ -b_2 (\hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2)) \\ m_2 L_1 l_2 \hat{J}_2 \cos(\theta_2) \sin(2\theta_2) \\ \frac{1}{2} \sin(2\theta_2) (\hat{J}_0 \hat{J}_2 + \hat{J}_2^2 \sin^2(\theta_2)) \\ -\frac{1}{2} m_2^2 L_1^2 l_2^2 \sin(2\theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2 l_2 \cos(\theta_2) \\ \hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2) \\ -m_2 l_2 \sin(\theta_2) (\hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ g \end{bmatrix}}{\hat{J}_0 \hat{J}_2 + \hat{J}_2^2 \sin^2(\theta_2) - m_2^2 L_1^2 l_2^2 \cos^2(\theta_2)} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
\theta_{1e} &= 0 \\
\theta_{2e} &= \pi \\
\dot{\theta}_{1e} &= 0 \\
\dot{\theta}_{2e} &= 0
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{31} & B_{32} \\ B_{41} & B_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A_{31} &= 0 \\ A_{32} &= \frac{gm_2^2 l_2^2 L_1}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ A_{33} &= \frac{-b_1 \hat{J}_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ A_{34} &= \frac{-b_2 m_2 l_2 L_1}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ A_{41} &= 0 \\ A_{42} &= \frac{gm_2 l_2 \hat{J}_0}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ A_{43} &= \frac{-b_1 m_2 l_2 L_1}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ A_{44} &= \frac{-b_2 \hat{J}_0}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ B_{31} &= \frac{\hat{J}_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ B_{41} &= \frac{m_2 L_1 l_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ B_{32} &= \frac{m_2 L_1 l_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\ B_{42} &= \frac{\hat{J}_0}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\tau = K_m i \quad (12)$$

Herleitung der Parameter (1 zu 1 aus dem Dokument bernommen.. die Herangehensweise muss also noch verndert werden!):

$$\begin{aligned} L_1 &= l_a \\ L_2 &= l_{pm} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} m_1 &= m_b + m_r + m_{sens} \\ m_2 &= m_p + m_{pm} \end{aligned} \quad (14)$$

$$J_{arm} = m_r \frac{l_r^2}{12} + m_r (\frac{1}{2}l_r + l_b - l_a)^2 \quad (15)$$

$$J_{pend1} = m_b l_a^2 \quad (16)$$

$$J_{sens} = m_{sens} (l_a - l_b - l_r - \frac{1}{2}l_c)^2 \quad (17)$$

$$J_{ps} = m_p (r_b + \frac{1}{2}l_p)^2 \quad (18)$$

$$J_{pm} = m_{pm} l_{pm}^2 \quad (19)$$

$$J_{arm} + J_{pend1} + J_{sens} = m_1 l_1^2 J_{pm} + J_{ps} = m_2 l_2^2 \quad (20)$$

$$l_1 = \sqrt{\frac{m_r \frac{l_r^2}{12} + m_r (\frac{1}{2}l_r + l_b - l_a)^2 + m_b l_a^2 + m_{sens} (l_a - l_b - l_r - \frac{1}{2}l_c)^2}{m_1}} \quad (21)$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{m_{pm} l_{pm}^2 + m_p (r_b + \frac{1}{2}l_p)^2}{m_2}} \quad (22)$$

... Hier sollten wir gucken, ob wie die Umformungen evtl. anders vornehmen.

$$Listed der Zahlenwerte \quad (23)$$

$$(24)$$

$$(25)$$

Swing-Up

$$U = n \cdot g \cdot \text{sign}(E - E_0) \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \quad (26)$$

$$E = E_{pot} + E_{kin} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} E_{pot} &= m_2 g l_2 (\cos(\theta_2) - 1) \\ E_{kin} &= \frac{1}{2} \dot{\theta}_2^2 \hat{J}_2 \end{aligned} \quad (28)$$

$$(29)$$

3 Identifikation der Parameter

4 Design der Controller

4.1 Pendelidentifikation

Beim Starten des Programmes zur Regelung des Pendels wird zunächst identifiziert, um welchen Pendelaufbau es sich handelt. Es wird dabei zwischen zwei zuvor definierten Pendelarmmlängen unterschieden. Für die Identifikation wird durch den Motor ein kurzer Impuls auf das Pendel gegeben. Nach diesem Impuls wird das Pendel schwingen gelassen, während der Controller den Verlauf von θ_2 aufzeichnet. Im Anschluss daran ist es möglich, aus den erhobenen Daten die Frequenz von θ_2 zu berechnen. Da sich die Frequenzen der Pendelkonfigurationen unterscheiden, kann das Programm so die entsprechenden Modelldaten laden und für die Regelung verwenden. In Abbildung ?? ist dieser Vorgang in den ersten fünf Sekunden zu erkennen.



Abbildung 2: Initiale Pendelidentifikation

Irgendwas stimmt mit der Referenzierung auf diese Abbildung nicht. Was habe ich falsch gemacht?

Wobei ich gerade sehe, dass das bei Thomas oben ebenfalls nicht geklappt hat

4.2 Signalverarbeitung

Das Ausgangssignal der Inkrementalgeber wird zunchst auf Radiant-Werte umgerechnet

4.3 Swing-Up-Controller

Der Swing-Up-Controller soll dem Aufschwingen des Pendels dienen und im Bereich zwischen circa $20^\circ < |\theta_2| < 90^\circ$ und basiert auf der Lyapunov-Funktion. Diese fhrt dazu, dass sich bei der Wahl von $\theta_2 = 0$ in der aufrechten Position des Pendels ein Regler ergibt, welche die Energie des Pendels minimiert:

$$U_{SU} = n \cdot g \cdot \text{sign}(E - E_0) \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \quad (30)$$

Der Term E_0 beschreibt die gewünschte, minimale Energie des Systems. Die Energie des Pendels E setzt sich aus der potentiellen Energie E_{pot} und der kinetischen Energie E_{kin} zusammen. Die potentielle Energie lsst sich aufgrund der Referenz im hchsten Punkt des Pendels wie folgt berechnen:

$$E_{pot} = m_2 \cdot g \cdot l_2 \cdot (\cos(\theta_2) - 1) \quad (31)$$

Die kinetische Energie ergibt sich zu:

$$E_{kin} = \frac{J_0}{2} \cdot \dot{\theta}_2^2 \quad (32)$$

Die Umsetzung des Reglers in Simulink ist in Abbildung ?? zu sehen.

4.4 Zweipunktregler

Fr den Bereich zwischen circa $|\theta_2| \geq 90^\circ$ soll der Zweipunktregler (eng. Bang-bang control) das invertierte Pendel regeln. Dieser schaltet die maximale positive oder negative Spannung auf den Motor, abhngig von θ_2 und $\dot{\theta}_2$, daraus folgt die betragungsfunktion:

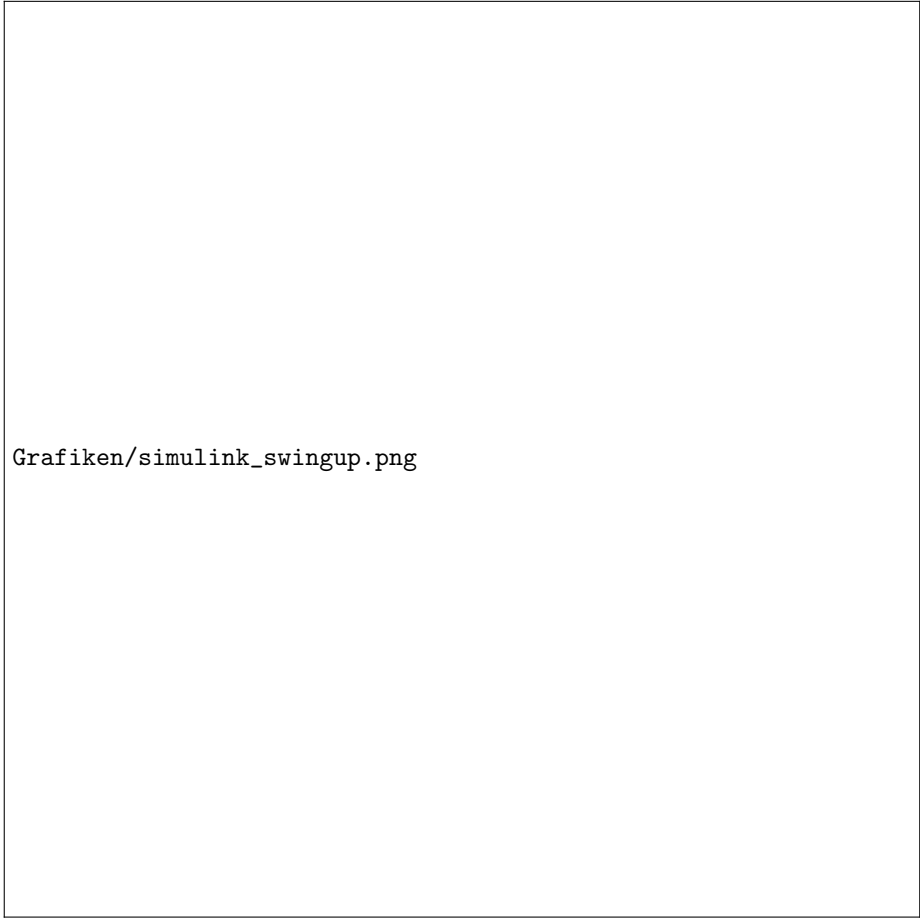
$$U = 10 \cdot \text{sign}(U_{SU} \cdot \theta_2 \cdot \cos(\dot{\theta}_2)) \quad (33)$$

Das entsprechende Simulink-Modell in Abb. ?? zu sehen.

4.5 Catcher

Der Catcher dient der genaueren Regelung des Pendels nahe des oberen Equilibriums von θ_2 . Um in dem Bereich optimal und robust zu Regeln, wird ein LQ-Regler verwendet. Dieser basiert auf der Minimierung der Cost-Funtion, welche folgenden Form besitzt:

$$V = \int_0^\infty (x^T(t)Qx(t) + u^t(t)Ru(t))dt \quad (34)$$



Grafiken/simulink_swingup.png

Abbildung 3: Swing-Up-Controller und Zweipunktregler

Abbildung 4: Swing-Up-Controller

Erhöht man die Diagonalwerte der Q-Matrix, werden die Fehler stärker gewichtet, allerdings steigt auch der Aufwand der Regelung. Die Matrix lässt sich über die Controllability-Matrix C und den linken Eigenvektor q der Matrix A wie folgt berechnen:

$$Q = C' \cdot q'^T \cdot q^T \cdot C \quad (35)$$

Für den Vektor q wurden folgenden Werte angenommen:

$$q = \begin{bmatrix} 180/\pi/180 \\ 0 \\ 0 \\ 180/\pi/0.1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Die Diagonalwerte der Matrix R der Cost-Funktion beeinflussen die Geschwindigkeit der Regelung und wurden zunächst für den Catcher auf eins gesetzt. Zusammen mit den Eingangs- und Ausgangsmatrizen A und B lässt sich mithilfe des Matlab-Befehls $F = \text{lqr}(A, B, Q, R)$ der LQR-Controller generieren. Die L -Matrix lässt sich über die Riccati-Gleichung $?$ herleiten. Zunächst ergibt sich die P -Matrix als Lösung der Riccati-Gleichung, daraus lässt sich mithilfe der bekannten Matrizen und des Place-Befehls $L = \text{place}(A', C', p)'$ in Matlab berechnen. Das Simulink-Modell des Observers ist in Abb. ?? zu sehen.



Abbildung 5: Observer des Catchers in Simulink

4.6 Stabilizer

Zur Rückführung des Pendels auf die Ausgangswinkel von θ_1 und Beibehaltung der oberen Equilibrium-Position wird auch eine LQ-Regelung verwendet, welche sich

nur durch die dreifache Einheitsmatrix für R und folgenden q -Vektor von dem Catcher unterscheidet:

$$q = \begin{bmatrix} 180/\pi/1 \\ 0 \\ 0 \\ 180/\pi/0.1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Der Observer des Stabilizers ist in Abb. ?? abgebildet, Abb. ?? bietet einen Überblick über die Verschaltung des Catchers und Stabilizers.

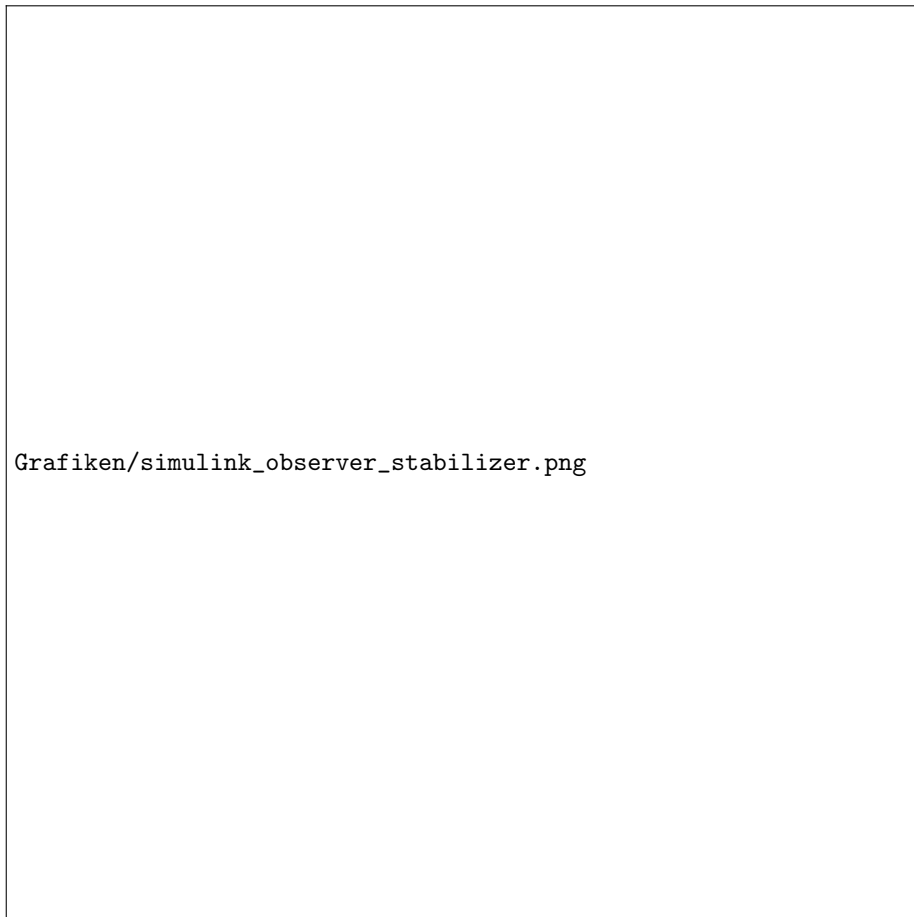


Abbildung 6: Simulink-Block des Observers des Stabilizers



Grafiken/simulink_top_equilibrium.png

Abbildung 7: Aufbau des Catchers und Stabilizers in Simulink

4.7 Soft-Switch

Um den bergang zwischen dem Catcher und dem stabilisierenden Controller mglichst weich zu gestalten, wurde ein Soft-Switch implementiert.

Ziel dieses Switches ist es, extreme Sprnge des Controllerausgangssignals beim Umschalten zwischen den Controllern zu verhindern, selbst wenn die einzelnen Regelsignale des Catchers und des Stabilisierers sehr weit auseinander liegen.



Abbildung 8: Soft-Switch

Die Umsetzung erfolgt, indem die einzelnen Regelsignale mit Verstrkungsfaktoren multipliziert werden, die in der Summe genau 1 ergeben, und sich das Gesamtsignal aus den gewichteten Einzelsignalen zusammensetzt.

Zunchst ist lediglich der Catcher aktiv. Dies kommt dadurch zum Ausdruck, dass sein Verstrkungsfaktor f_c den Wert 1 besitzt. Folglich muss der Faktor f_s des Stabilisierers 0 betragen.

Wenn nun der Betrag des Winkels θ_2 fr mindestens t_{wait} kleiner als θ_{trig} ist, beginnt der Crossfader, das Verhltnis der Regelsignale zu verndern. Whrend der Faktor des Catchers innerhalb der Zeit t_{fade} linear von 1 auf 0 abflft, erhht sich der Faktor des Stabilisierers gegenlufug innerhalb derselben Zeit von 0 auf 1. Nach Abschluss dieses Vorgangs ist nur noch der Stabilisierer fr die Regelung des Pendels zustndig (vgl. Abbildung ??).

Wird zu irgendeiner Zeit der Winkel θ_{trig} berschritten, wird instantan mittels eines Hardswitches der Catcher wieder aktiv geschaltet.
In unserem Controller wurden die Werte wie folgt gewhlt:

$$\begin{aligned}\theta_{trig} &= 5^\circ \\ t_{wait} &= 0.5s \\ t_{fade} &= 5s\end{aligned}$$



Abbildung 9: Soft-Switch

Die Abbildung ?? zeigt die Umsetzung dieses Soft-Switches in Simulink. Der Block ‘ramp’ erzeugt dabei den Faktor f_s woraus sich ebenfalls f_c ableiten lsst.

Integratoren als Timer erwennen?

Hinweis: Die Funktionsweise dieses Verfahrens ist dabei identisch mit der eines Crossfaders, wie er teilweise beim bergang zwischen zwei Musikstcken verwendet wird.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind Versuchsergebnisse dargestellt, die an dem geregelten Pendel gewonnen wurden. Dafür wurde das stabilisierte Pendel mit einem kurzen Strimpuls beaufschlagt und die Reaktion aufgezeichnet. Dieser Strimpuls erfolgte per Hand und wurde in unterschiedlichen Strken durchgeführt, um so die einzelnen Controller testen zu können.

5.1 Swing-Up

Zunächst soll anhand von Abbildung ?? der Aufschwing-Vorgang betrachtet werden. Wie bereits in Kapitel ?? erwähnt, vollzieht der Controller in den ersten 5 Sekunden die Identifikation des Pendels. Der dafür verwendete Impuls lässt sich bei θ_1 nahe $t = 0s$ erkennen. Nach diesen 5 Sekunden beginnt der Controller zunächst durch Verwendung des Zweipunktreglers und des Swing-Ups den Pendelarm in den Bereich $|\theta_2| < 20^\circ$ zu bewegen, in welchem dann der Catcher aktiv wird um ein Berschwingen zu verhindern. Nach einer kurzen Zeit, in der gilt $|\theta_2| < 5^\circ$, übernimmt dann der Stabilizer mehr und mehr die Kontrolle (vgl. Kapitel ??), welcher schließlich auch θ_1 auf seinen Anfangswinkel regelt.

5.2 Stabilisierer

Der Stabilisierer wird in Abb. ?? durch einen schwachen Impuls getestet, wodurch θ_2 um 2 Grad ausgelenkt wurde. Dadurch bleibt der Stabilizer weiterhin aktiv und regelt die Motorspannung so, dass bei dem Berschwingen von θ_1 das Pendel wieder in die obere Position gebracht wird. Zudem ist auch zu erkennen, dass der Regler auch θ_1 in die Ausgangsposition zurückführt.

5.3 Catcher

In Abb. ?? sind die Auswirkungen des Reglers nach einer Strung von -8 Grad zu erkennen. Der Catcher sorgt dabei zunächst für ein schnelles Rückstellen des Pendels auf das Top Equilibrium, während nach der 3. Sekunde der Einfluss des Stabilizers steigt und dieser im Mittel θ_1 gegen 0 Grad regelt, allerdings mit starken Schwingungen, um die Abweichung von θ_2 auszugleichen.

5.4 Watchdog

Hier habe ich echt wenig Ahnung von!

6 Ergebnisse



Grafiken/Swingup_kurz.png

Abbildung 10: Der Swing-Up-Vorgang



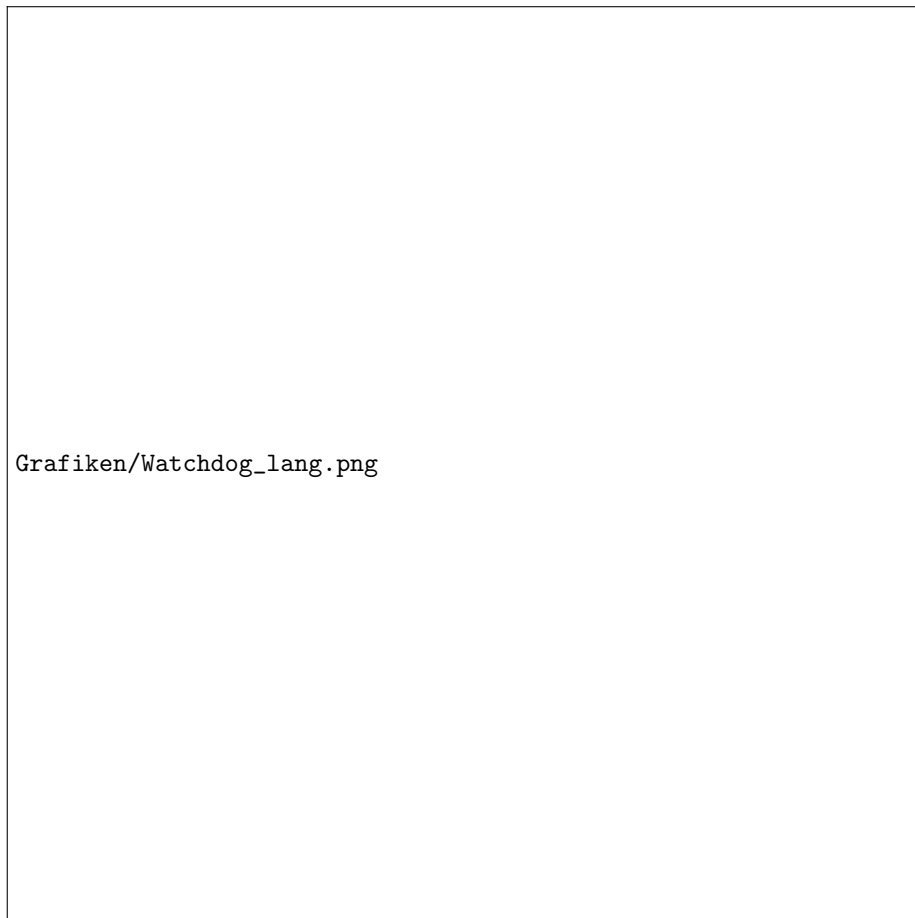
Grafiken/Stab_lang.png

Abbildung 11: Strung $< 5^\circ$



Grafiken/Catch_kurz.png

Abbildung 12: Strung $>5^\circ$



Grafiken/Watchdog_lang.png

Abbildung 13: Watchdog