



Interdisziplinäres Teamprojekt

Parameterschätzung und Entwurf einer Modellprädiktiven Regelung eines autonomen Modellfahrzeuges

von

Hannes Heinemann
Matrikelnummer: 184102

André Pieper
Matrikelnummer: 184960

2. April 2015

Betreuer:

M. Sc. Juan Pablo Zometa *

M. Sc. Michael Maiworm *

Kurzdarstellung

In diesem Bericht werden Werkzeuge und Verfahren aufgezeigt, um für ein autonomes Modellfahrzeug im Maßstab 1:10 eine Fahrspurverfolgung zu entwickeln. Diese Arbeit ist Teil des studentischen Teamprojekts „oTTocar“ der OvGU und wurde unter der Berücksichtigung der Teilnahme an dem internationalen Wettbewerbs „Carolo-Cup“ [2] entworfen. Die Betreuung und Zusammenarbeit erfolgt dabei durch die Fakultäten für Informatik, für Elektrotechnik und Informationstechnik und für Maschinenbau. Die Vorbereitung dieser Arbeit ist maßgeblich an das Forschungsprojekt [16] von Viktoria Wiedmeyer und Andreas Himmel geknüpft, auf das sich das im folgenden verwendete Modell der Fahrzeugdynamik hauptsächlich bezieht.

*Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Institut für Automatisierungstechnik - IFAT, Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Prof. Dr.-Ing. Rolf Findeisen, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Parameterschätzung	4
2.1	Direkte Messmethoden	4
2.2	Indirekte Messmethoden	5
2.3	Schätzverfahren	9
2.4	Ergebnisse	9
3	Fahrspurregelung mittels modellprädiktiver Regelung	11
3.1	Problemformulierung für die modellprädiktive Regelung	11
3.2	Konkrete Implementierung der Fahrspurregelung für das oTToCAR	12
3.3	Spurwechsel	14
3.4	Dynamic Reconfigure	15
3.5	Zukünftige Schritte	15
	Literaturverzeichnis	15

1 Einleitung

Im Zuge der „digitalen Revolution“¹ die durch die rasante Entwicklung der Halbleitertechnologien (beschrieben durch das mooresche Gesetz²) ermöglicht wird, übernehmen Computer immer mehr Aufgaben in nahezu allen Bereichen einer modernen Gesellschaft. Neben der industriellen Nutzung finden sich immer mehr Computer in Form mobiler Geräte im Alltag eines jeden Menschen wieder und sie nehmen dabei dem Nutzer viele einfache Aufgaben ab, wie z.B. die Navigation auf einer Straße zu einem Ziel. Durch die steigende Leistungsfähigkeit der Rechensysteme wäre der nächste Schritt auch die höheren Aufgaben auf die Maschinen zu verteilen und somit den Menschen weiter zu entlasten. Eine Aufgabe ist dabei das Führen eines Fahrzeuges ohne menschliches Handeln. Das autonome Fahren ist hierbei keine Fiktion mehr, wie in Filmen wie „I, Robot“ [1], oder „Demolition Man“ [9] suggeriert wird, sondern der Prozess ist schon soweit fortgeschritten, dass der autonome Straßenverkehr in naher Zukunft Realität wird. Dafür spricht zum einen, dass schon die ersten autonomen Fahrzeuge des „EUREKA-PROMETHEUS-Projekts“ [6] vor gut 20 Jahren weit mehr als 1758 Km auf öffentlichen Straßen zurückgelegt haben. Und zum anderen, dass in den USA erste autonome Fahrzeuge für den Straßenverkehr zugelassen [7] und in Europa zumindest dafür neue Gesetze entworfen werden [5]. So bleibt nur noch die Frage, wann sich der Straßenverkehr auf das autonome Fahren umstellt und wie die Lösung am Ende aussieht.

Vor diesem Hintergrund findet der Carolo-Cup in Braunschweig seit nun mehr acht Jahren statt, welcher studentische Teams aller Fachrichtungen und Universitäten in einem Wettbewerb gegeneinander antreten lässt, um das beste Konzept und die beste Umsetzung eines autonomen Fahrzeuges zu präsentieren. Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg beteiligt sich ebenfalls an diesem Wettbewerb mit dem Projekt „oTToCAR“. Die einzelnen Disziplinen sind Einpark-, Spurverfolgungs- und Hindernisszenarien mit Fahrspurwechsel, wofür neben der Hardware- und Software-Entwicklung auch ein Regelungskonzept entwickelt werden muss. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer modellbasierten Regelung für alle Szenarien und das dafür verwendete Modell mit der nötigen Parameterschätzung. In einer vorangegangenen Arbeit [16] wurde bereits ein Modell entwickelt, deren Parameter jedoch aufgrund eines fehlenden realen Fahrzeuges nicht bestimmt werden konnten. Die jetzige Arbeit ist zeitlich später einzuordnen, in der ein fertiger Prototyp bereits zur Verfügung stand und die Parameterschätzung vollendet werden konnte.



Abb. 1: Ausschnitt vom Parcours im Carolo-Cup [3]

¹Ähnlich der industriellen Revolution vor 200 Jahren, eine tiefgreifender Wandel von allen gesellschaftlichen Bereichen, wie Politik, Wirtschaft und Kultur. Hervorgerufen durch die Entwicklung von Computern und deren enormen Verbreitung, wird die heutige Zeit auch als „Zweite Moderne“ bezeichnet

²Formuliert 1965 von Gordon Moore, der eine Verdopplung der Anzahl von Schaltkreiskomponenten auf einem integrierten Schaltkreis alle 12 bis 24 Monate vorhersagte und damit bis heute Recht bewies.

2 Parameterschätzung

Um die unbekannten Parameter eines Modells schätzen zu können, wird zunächst ein valides Modell und einen Experimentierstand benötigt. Das Modell wird dem Bericht oTToCAR [16, Seite 12] entnommen, welches dort auch schon auf seine grundlegende physikalische Korrektheit mit Simulationen überprüft wurde. Das gegebene Modell besitzt dabei zwei Arten von Parametern. Zum einen sind es direkt bestimmbare Parameter, zum anderen sind es Parameter die nur durch modellbasierte Schätzverfahren ermittelt werden können. Um die Simulation mit dem realen Fahrzeug in seinem Verhalten vergleichen zu können, werden dabei Messungen von allen Zuständen benötigt. Da diese Experimente jedoch nicht immer einfach zu realisieren sind und um den technischen Aufwand der Messungen so gering wie möglich zu halten, sollten die zu messenden Zustände beschränkt und so gewählt werden, dass:

- sie charakteristisch für das Verhalten sind
- durch sie andere Zustände bestimmt werden können
- die wichtigsten Regelgrößen auch direkt gemessen werden

2.1 Direkte Messmethoden

Die direkte Bestimmung von Parametern erfolgt weitgehend durch die Messung der selbigen, oder deren einfache Berechnung durch weitere messbare Größen. Im Falle der Eingangsgröße u_1 , dem Einschlagswinkel der Räder, musste zum Beispiel das Ansteuerungssignal des Servomotors in einen Winkel für die Räder umgerechnet werden. Das Ansteuerungssignal ist hierbei ein 256-stufiges PWM-Signal, welches in eine Winkelangabe umgerechnet werden muss. Für die Versuchsanordnung wurde das Fahrzeug zuerst so erhöht, dass die Räder nicht mehr auf dem Boden auflagen. Diese Vorgehensweise war nötig, da bei Kontakt der Räder mit dem Boden bei einem stehenden Fahrzeug der Haftwiderstand so hoch ist, dass sich nur eine kleinere Winkeländerung ergeben und die Messung verfälschen würde. Denn bei schneller Fahrt verringert sich dieser Widerstand auf nahezu Null und kann somit vernachlässigt werden. Für die Messung wurde längs an das linke Vorderrad eine Verlängerung befestigt und für jede Servoeinstellung eine Winkelauslenkung gemessen und die Kalibrierung des Servomotors vorgenommen.

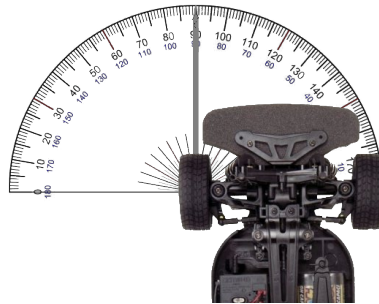


Abb. 2: Messung der Relation PWM-Stufe des Servos zum Einschlagswinkel der Räder (aus [15] und [13])

Als Ergebnis dieses Experimentes kam heraus, dass die Erhöhung um eine PWM-Stufe des Servomotors konstant eine Drehung der Räder um 0.0028 rad entspricht. Andere Parameter konnten durch Recherche ermittelt werden, da sie sehr gebräuchliche Kenngrößen darstellen, wie z.B. die Dichte der Luft. Desweiteren wurde das Trägheitsmoment durch die Arbeit [14] mithilfe eines CAD-Modells vom Fahrzeug berechnet. In der Tabelle 1 werden alle diese Größen diesbezüglich aufgeführt.

Physikalische Größe	Exakter Wert	Einheit
Dichte der Luft	$\rho_L = 1,204$	$[\text{kg s}^{-1}]$
Erdbeschleunigung	$g = 9,806$	$[\text{m s}^{-2}]$
Masse	$m = 2,8$	$[\text{kg}]$
Radabstand	$l = 0,257$	$[\text{m}]$
Radius des Rades	$r = 0,0335$	$[\text{m}]$
Übersetzungsfaktor Drehzahl Motor \rightarrow Räder	$\epsilon = 5,52$	$[-]$

Tabelle 1: Direkt bestimmbare Parameter

2.2 Indirekte Messmethoden

Die verbliebenen zu ermittelnden Parameter erfordern weit umfangreichere Messungen, wie zum Beispiel die Parameter für den Rollwiderstand und die Schräglauflübersetzung der Räder, die sich auch nicht direkt messen lassen. Für die Suche nach geeigneten Parametersätzen wird dabei ein Schätzverfahren benötigt, das anhand von anderen direkt messbaren Größen die von den gesuchten Parametern abhängig sind, die zu bestimmenden Parameter indirekt ermitteln kann. Dabei sind die wohl charakteristischsten Messgrößen des Fahrzeuges seine Position und Geschwindigkeit. Anhand der gegebenen Zustandsgleichungen und aus logischen Überlegungen erkennt man eine starke Abhängigkeit zu allen gesuchten Parametern. In diesem Abschnitt wird sich mit der Frage beschäftigt, wie die Messung dieser Zustände umzusetzen ist und in der nächsten Passage wird klärt, wie danach aus den gewonnen Messdaten die noch fehlenden Parametern bestimmt werden.

2.2.1 Geschwindigkeitsmessung

Die Geschwindigkeitsmessung wird hierfür intern vom Fahrzeug bereitgestellt. Sie wird dabei ähnlich wie an einem Fahrrad realisiert, indem Neodymmagnete auf alle Räder befestigt und durch Hall-Sensoren die Bewegungen der Magneten erfasst werden. Denn das Magnetfeld am Hall-Sensor ändert sich, sobald die Räder anfangen zu rotieren und die Änderung des Magnetfeldes kann schließlich direkt in eine Geschwindigkeit umgerechnet werden. Die Vorteile der Geschwindigkeitsmessung an jedem einzelnen Rad ist die höhere Auflösung, sowie eine bessere Messung der Geschwindigkeiten in Kurven. Da nämlich das Modellauto über ein Differentialgetriebe verfügt, bewegen sich die Räder in Kurvenfahrten unterschiedlich schnell, sodass die tatsächliche Geschwindigkeit des Fahrzeuges gemittelt werden muss.

2.2.2 Entwicklung eines Tracking-Systems zur Positionsmessung

Die Positionsbestimmung hingegen wird durch eine Kamera realisiert, die auf ein vorher definiertes Testfeld ausgelegt werden muss. Die technischen Anforderungen an das Tracking sind dabei ein ausreichend großes Testfeld, sowie eine geeignete Kamera. Die Größe Parcours war jedoch durch die räumlichen Gegebenheiten stark begrenzt, sodass der Aufbau lediglich eine Fläche von 5×5 Metern misst. Die Wahl der Kamera hängt dabei von verschiedenen Anforderungen ab, die vor einer Installation des Systems klar definiert werden müssen. In dem Fall eines sich schnell bewegenden Fahrzeuges ist die Bilderanzahl pro Sekunde einer Kamera sehr hoch zu gewichten, um Bewegungsunschärfe und fehlende Bewegungen zwischen zwei Bilder zu minimieren, welche die Messungen verfälschen können. Desweiteren spielt die Auflösung für Positionsgenauigkeit und die Schnittstellen der Kamera für hohe Datenraten und Netzwerkfähigkeit eine große Rolle. Nach dem Aufbau des Parcours und der Installation des Tracking-Systems, muss die Kamera kalibriert werden. Die Kalibrierung ist notwendig, um die Symmetrien die durch den „Fischaugeneffekt“ der Linse und der perspektivischen Verzerrung entstehen wiederherzustellen. Ein gängiges Verfahren zur Beseitigung der Linsenkrümmung und der perspektivischen Verzerrung ist die Kalibrierung mittels Schachbrettmuster. Die Beseitigung des Effektes der Linsenkrümmung wird mittels einer Vorwärtstransformation der Pixel des entkrümmten Bildes in das gekrümmte realisiert [17]. Der Algorithmus dahinter funktioniert folgendermaßen:

1. Generierung der Kamera-Matrix K , oder auch Matrix der intrinsischen Parameter mithilfe der „Camera Calibration Toolbox for Matlab“ [8]. Dabei charakterisieren die Einträge f_x, f_y die Brennweite und c_x, c_y bilden den Mittelpunkt der Linse auf dem Kamerabild.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Normierung der Kamera-Matrix (Koordinate z' entfällt):

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} n_{h,1} & n_{h,1} & \dots & n_{h,1} & n_{h,1} & n_{h,2} & \dots & n_{h,2} & \dots & n_{h,i} \\ n_{b,1} & n_{b,2} & \dots & n_{b,j-1} & n_{b,j} & n_{b,1} & \dots & n_{b,j} & \dots & n_{b,j} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

mit

$n_h = 1, 2, 3, \dots$, Höhe der Kameraauflösung

$n_b = 1, 2, 3, \dots$, Breite der Kameraauflösung

3. Anwendung eines nichtlinearen Modells für die radiale Linsenkrümmung, um die verzerrten Koordinaten abzubilden. Dabei stammen die Parameter k_1, k_2 (Koeffizienten der radialen Verzerrung) und p_1, p_2 (Koeffizienten der tangentialen Verzerrung) ebenfalls aus Schritt 1 und wurden mit [8] berechnet.

$$\begin{aligned} x'' &= x' \cdot (1 + k_1 \cdot r + k_2 \cdot r^2) + 2p_1 \cdot x'y' + p_2 \cdot (r + 2x'^2) \\ y'' &= y' \cdot (1 + k_1 \cdot r + k_2 \cdot r^2) + 2p_2 \cdot x'y' + p_1 \cdot (r + 2y'^2) \end{aligned}$$

mit

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$$

4. Nun lassen sich die Projektionen u und v erstellen, durch deren Anwendung mittels einer linearer Interpolation auf das Originalbild ein entzerrtes Bild erstellt werden.

$$u = f_x \cdot x'' + c_x$$

$$v = f_y \cdot y'' + c_y$$

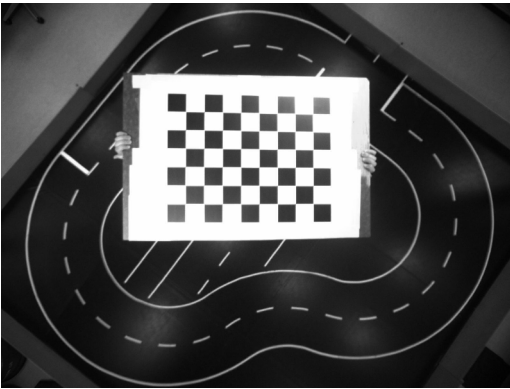


Abb. 3: Rohdaten der Kamera

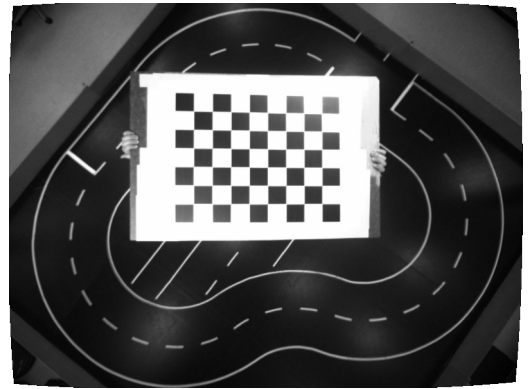


Abb. 4: Kamerabild nach der Entzerrung

Anschließend wird die perspektivische Ansicht in eine orthogonale Draufsicht projiziert. Dafür müssen die Ecken eines Rechtecks, bzw. die Ecken des Parcours (falls alle Winkel rechteckig) auf dem Bild markiert und

eine homographische Matrix gebildet werden, damit ein sogenannter „Top View“ des Bildes erstellt werden kann. Diese Vorgehensweise ist bekannt unter dem Namen „Inverse Perspective Mapping“ ([12] und [10]):

1. Generierung der extrinsischen Matrix T_{ext} mithilfe von [8]. Die Einträge stehen hierbei für die Translation in die entsprechende Richtung.

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

2. Ermittlung der Eckpunkte P_1, P_2, P_3 und P_4 in Pixelkoordinaten des Rechtecks/Parcours und die Matrix der Seitenlängenverhältnisse in Pixeln oder Meter.

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad P_n = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d(P_1 \rightarrow P_2) & d(P_3 \rightarrow P_4) \\ 0 & d(P_2 \rightarrow P_3) & d(P_4 \rightarrow P_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Rotation um den Winkel α und Translation der Bildpunkte relativ zur Kameraposition mit anschließender Normierung und der Projektion in die Zielkoordinaten.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{rt} = R \cdot L + T * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{Target} = K \cdot X_{rt}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{rt|3,1} & \dots & X_{rt|3,4} \\ X_{rt|3,1} & \dots & X_{rt|3,4} \\ X_{rt|3,1} & \dots & X_{rt|3,4} \end{bmatrix}$$

4. Mit der gewonnenen Projektion X_{Target} lassen sich mit MATLAB unter der Verwendung von der Funktion *homography2d* [10], *maketform* und *imtransform* [11] das Bild im Anschluss perspektivisch entzerren.



Abb. 5: Perspektivische Ansicht des Parcours



Abb. 6: Top-View Projektion des Parcours

Nach der Kalibrierung der Kamera stellt sich die Fragestellung nach der Art der Positionserfassung. Die erste Lösung war eine Farberkennung, in der zwei Scheiben mit jeweils einer anderen Farbe auf den vorderen und hinteren Teil des Fahrzeuges befestigt wurden. Dadurch kann die Ausrichtung und der Mittelpunkt des Fahrzeuges bestimmt werden. Diese Methode war jedoch anfällig für Farbreflexionen auf der Fahrbahn, sodass die Farbwiedergabe, Belichtungszeit und Raumbelichtung mitunter vom Stand der Sonne abhängig war und ständig Neueinstellungen nach sich zog. Als zweite Lösung wurde im Team die Positionsbestimmung durch Infrarot-LEDs erarbeitet. Dabei wurde die Kamera um einen Filter erweitert der nur noch infrarotes Licht durchlässt. Am Fahrzeug wurden am Vorderteil zwei und hinten eine Infrarot-LED angebracht und deren Position im Bild bestimmt. Durch diese Vorgehensweise wird der Rechenaufwand für die Bildverarbeitung auf ein Drittel reduziert, da keine Farbinformationen mehr gespeichert werden. Denn vorher waren die Farbinformationen in einer $B \times H \times 3$ Matrix kodiert, welche sich durch eine Schwarz-Weiß-Kodierung auf eine $B \times H \times 1$ Matrix reduzierte. Zudem ist dieses Verfahren weniger störanfällig, da die einzigen infraroten Lichtquellen die LEDs sind. Somit entfällt auch der Aufwand für die Neueinstellungen der Kamera. Es hat sich sogar gezeigt, dass die Kamera dadurch eine geringere Belichtungszeit benötigt um die LEDs zu erkennen, was wiederum die Anzahl der Bilder pro Sekunde erhöhte.

2.2.3 Synchronisierung interner und externen Messdaten

Nach der Aufnahme der externen und internen Messwerte, müssen diese für die Kostenfunktion aufbereitet werden. Die Aufnahme der Messungen erfolgt dabei durch das Framework ROS (für Robot Operating System), welches alle Messungen über einen Server koordiniert und den Zeitpunkte einer jeder Messung protokolliert. Da die externen Positionsdaten der Kamera einen Takt von 50 Hz und die internen Sensoren der Geschwindigkeitsmessungen mit einem Takt von 100 Hz laufen, sind diese nicht koexistent. Um diese Daten miteinander zu synchronisieren wurde die Methode der linearen Approximation gewählt, um zu jedem Zeitpunkt Messdaten vorrätig zu haben. Dies ermöglicht einen unkomplizierten Umgang der Daten im Schätzverfahren und sorgt für eine bessere Vergleichsbasis zwischen realen und simulierten Zuständen.

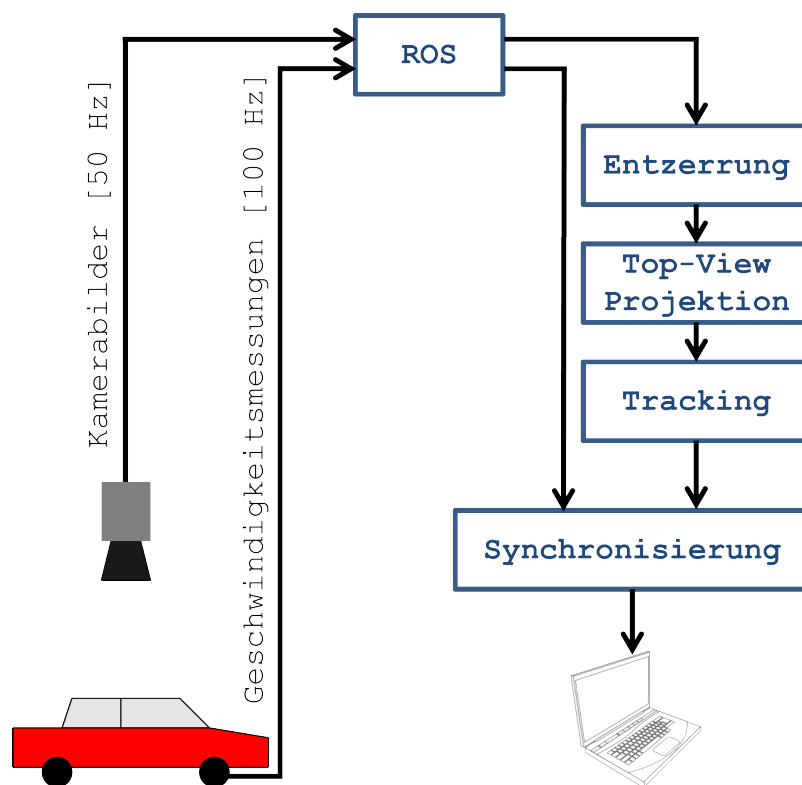


Abb. 7: Workflow des Tracking-Systems

2.3 Schätzverfahren

Unter der Verwendung der gemessenen Zustände $y_{mess} = \{x_1, x_2, \phi, \dot{\phi}, v\}$ mit x_1, x_2 für die Position, $\phi, \dot{\phi}$ für die Winkelauslenkung und die Winkelgeschwindigkeit und v für die Geschwindigkeit des Fahrzeuges im Weltkoordinatensystem, lassen sich durch die Wahl einer geeigneten Kostenfunktion und Optimierungsverfahrens die gesuchten Parameter identifizieren. Als Kostenfunktion wurde die Differenz aus gemessenen und simulierten Zustände mit entsprechenden Gewichtungen gewählt und diese zusätzlich quadriert, um die Kostenfunktion annähernd parabolisch darzustellen. Die simulierten Zustände werden anhand dem Modell aus [16] und mit einem ODE Solver, basierend auf einem expliziten Runge-Kutta-Verfahren (*ode45*) in Matlab ermittelt und in dem Vektor $y_{sim} = \{x_{sim|1}, x_{sim|2}, \phi_{sim}, \dot{\phi}_{sim}, v_{sim}\}$ zusammengefasst. Mit den synchronisierten Daten aus den Messreihen lassen sich einzelne Zeitpunkte extrahieren und diese in der Simulation explizit angeben, sodass zu den ausgewählten Zeitpunkten in der Simulation auch reale Messwerte existieren. Die Gewichtungen q_k für jeden Zustand wurden dabei so gewählt, dass die Güte eines simulierten Zustandes zu gleichen Teilen in die folgende Kostenfunktion mit einfließt:

$$J = \sum_{t=0}^{t_{end}} \sum_{k=1}^5 q_k \cdot (y_{mess,k}(t) - y_{sim,k}(t))^2$$

Zur Optimierung wurden zwei Ansätze verfolgt um ein Optimum gewährleisten zu können. Zum einen wurde die Matlab interne Funktion *fmincon* und zum anderen ein selbst entwickelter Partikel-Schwarm-Algorithmus nach [4] verwendet. Dabei galt es den zu schätzende Parametervektor $p = \{\gamma, f_R, C_\alpha, T_V\}$, bestehend aus dem Verhältnis der Kraftübertragung zwischen Vorder- und Hinterräder γ , dem Rollwiderstand f_R , der Schräglauflübersetzung C_α und der zeitlichen Verzögerung des Lenkeinschlages T_V zu bestimmen. Um die Dimension des Vektors zu reduzieren, wurde schon in [16] angedacht den Rollwiderstand allein durch eine Geradeausfahrt zu schätzen, da die anderen Parameter lediglich Einfluss auf die Zustände während Kurvenfahrten besitzen. Diese Trennung der Parameterschätzung ermöglichte es, ein optimales f_R zu finden, sodass in den Kurvenfahrten alle weiteren Parameter bestimmt werden konnten und beide Optimierungsverfahren stets in das gleiche Optimum liefen. In 8 wurde als Beispiel ein solcher Optimierungsaufwurf durch den Partikel-Schwarm-Algorithmus dargestellt. Zu sehen der Verlauf der Kostenfunktion über jede neue Generation von Partikeln bei einer Geradeausfahrt für den Zustand f_R . Dabei wird sehr gut die Konvergenz vom Algorithmus ersichtlich.

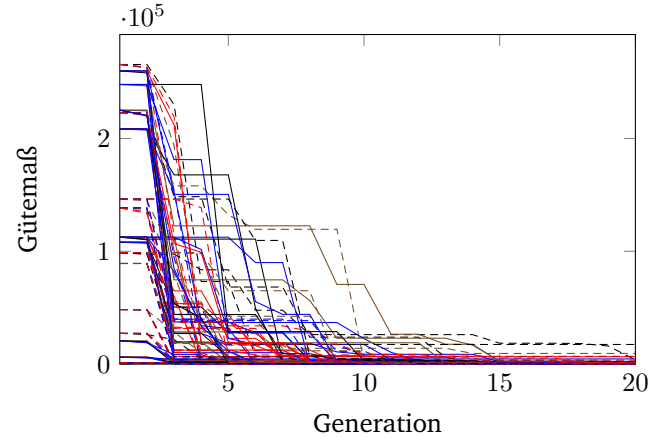


Abb. 8: Verlauf der Kostenfunktion für alle Partikel

2.4 Ergebnisse

In der Anwendung der Schätzverfahren revidierten sich einige der Annahmen aus [16] und es mussten teilweise neue getroffen werden, um bessere Ergebnisse zu erreichen. Zum Beispiel wurde die Annahme getroffen, dass die Schräglauflübersetzung C_α von Vorder- und Hinterräder gleich ist. Jedoch ergaben sich bei einer Trennung der Schräglauflübersetzung von Vorder- und Hinterräder eindeutig bessere Ergebnisse. Zudem musste der Eingang des Motordrehmomentes um ein weiterer Parameter η_M erweitert werden, um den Wirkungsgrad des Drehmomentes zu beschreiben, welches vom Motor erzeugt auf die Räder geleitet wird. Somit ergaben sich folgende Parameter, die das Modell mit einer ausreichenden Genauigkeit beschreiben:

Physikalische Größe	Exakter Wert	Einheit
Kraftverteilung Vorder- zu Hinterrad	$\gamma = 0,5$	[-]
Reibungskoeffizient	$f_R = 1,857$	[-]
Schräglauflübersetzung hinten	$C_{h,\alpha} = 0,93$	[-]
Schräglauflübersetzung vorn	$C_{v,\alpha} = 1,1$	[-]
Wirkungsgrad Drehmoment Motor \rightarrow Räder	$\eta_M = 0,55$	[-]
Zeitl. Verzögerung von u_1	$T_V = 0,1$	[s]

Tabelle 2: Ergebnisse der geschätzten Parameter.

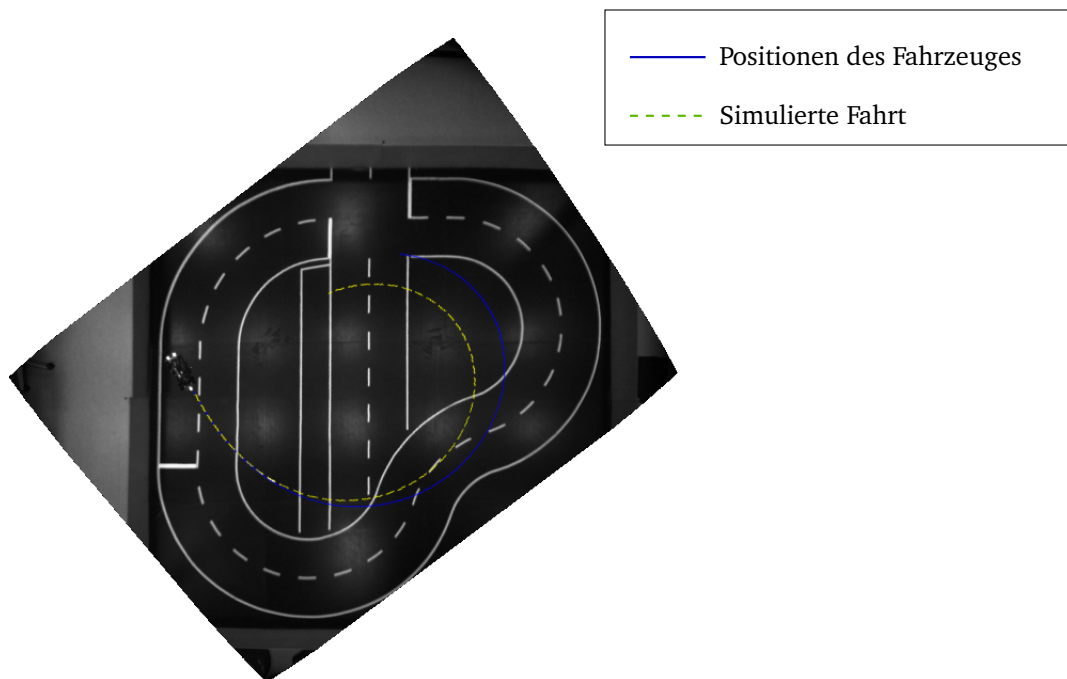


Abb. 9: Reale Messwerte und simulierte Zustände im direkten Vergleich

In Abbildung 9 wurden die Simulationsdaten mit den real gemessenen Positionsdaten direkt gegenübergestellt. Die Fahrt einer Linkskurve wurde dabei mit einer Endgeschwindigkeit von $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und einem konstanten Lenkeinschlag von ungefähr 15° durchgeführt. Die Ergebnisse scheinen auf den ersten Blick nicht zufriedenstellend zu sein, da nach ungefähr drei Metern die Abweichung beider Kurven größer als die Fahrspurbreite wird. Die Gründe sind zum einen, dass das Modell die Realität nur unzureichend beschreibt und zum anderen das bei einer numerischen Berechnung eines nichtlinearen Differentialgleichungssystem stets Berechnungsfehler gemacht werden. Jedoch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass im autonomen Fahrmodus die Kamera maximal zwei Meter voraus blicken kann, relativiert sich die Güte des Modells zu einer sehr guten Vorhersage für einen begrenzten Horizont. Da in jedem Schritt das Fahrzeug wieder auf die Trajektorie platziert wird, summiert sich somit der gemachte Fehler nur bis zum nächsten Messzeitpunkt und wird danach wieder auf Null zurückgesetzt. In einer zukünftigen Version vom „oTToCar“ ist die Spurerkennung nicht mehr allein durch die Kamera-Wahrnehmung gegeben. Zusätzlich soll sich das Auto in einer Weltkarte zurechtfinden und die Pfade entlang der Fahrbahn weit im Voraus berechnet werden. Für diese Zukunft reicht das Modell und die Parameter jedoch nicht mehr aus und muss weiter verbessert werden.

3 Fahrspurregelung mittels modellprädiktiver Regelung

In allen dynamischen Disziplinen des Carolo-Cups besteht die wichtige Teilaufgabe möglichst fehlerfrei einer in weiß auf schwarz aufgeklebten Fahrbahn zu folgen. Um diese Aufgabe zu erfüllen, wurde ein modellprädiktiver Regelansatz gewählt.

Bei der modellprädiktiven Regelung (MPC) handelt es sich um eine Form der optimalen Regelung, bei der wiederholt eine Berechnung der optimalen Steuerung für ein System ausgehend von dessen aktuellem Zustand stattfindet. In vielen Bereichen finden MPCs immer häufiger Anwendung, da sie eine direkte Berücksichtigung von Beschränkungen erlauben und eine Form des strukturierten Reglerentwurfs ausgehend von der modellierten Systemdynamik darstellen. Dabei kann durch die geeignete Wahl der Kostenfunktion und deren Wichtungsparemtern die Güte des Reglers gezielt beeinflusst werden. Allerdings ergeben sich auch Schwierigkeiten bei der Verwendung von MPCs. Zum einen ist die Konvergenz der Optimierung gegen einen optimalen Wert für die Optimierungsvariablen und die Stabilität des geschlossenen Kreises insbesondere bei nichtlinearen Systemmodellen oft nur schwierig nachweisbar und zum anderen stellt das wiederholte Lösen des meist hochdimensionalen Optimierungsproblems während der Laufzeit in genügend schneller Geschwindigkeit eine große Herausforderung dar.

3.1 Problemformulierung für die modellprädiktive Regelung

Im realen Anwendungsfall des oTToCAR-Projekts eignet sich eine Systemdarstellung in zeitdiskreter Form ([?]), bei der die Lösung des Optimierungsproblems weniger komplex ist und die ebenfalls zeitdiskreten Messwerte vom realen System weniger kompliziert integriert werden können. Demnach sind die diskretisierten Systemgleichungen wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}(k)) \end{aligned}$$

mit den nichtlinearen Funktionen $\mathbf{f}(\cdot)$ und $\mathbf{g}(\cdot)$, wobei

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &\in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n \\ \mathbf{u}(k) &\in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^m \\ \mathbf{y}(k) &\in \mathcal{Y} \subset \mathbb{R}^r \end{aligned}$$

Ausgehend vom aktuellen Zustand $\mathbf{x}(k)$ des zu regelnden Systems, der wenn nicht messbar geschätzt werden muss, wird anhand des Systemmodells das zukünftige Systemverhalten

$$\mathbf{x}_p = \{\mathbf{x}(k+1), \dots, \mathbf{x}(k+n_p)\}$$

bis zum Prädiktionshorizont n_p unter der Optimierung einer Sequenz von Eingängen

$$\mathbf{u} = \{\mathbf{u}(k), \dots, \mathbf{u}(k+n_c-1)\}$$

bis zum Stellhorizont n_c vorhergesagt. Aus der gefundenen optimalen Eingangssequenz \mathbf{u}^* wird der erste Eintrag $\mathbf{u}^*(k)$ auf das zu regelnde System angewandt. Im nächsten Zeitschritt kann der neue Zustand gemessen bzw. geschätzt werden und die Optimierung beginnt von neuem. Ziel dabei ist es einer Referenztrajektorie \mathbf{x}_r zu folgen.

Für das an jedem Zeitschritt k zu lösende Minimierungsproblem wurde die benötigte Kostenfunktion J in

quadratische Form mit \mathbf{x}_p und \mathbf{u} als Optimierungsvariablen aufgestellt:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}_p, \mathbf{u}} J &:= \sum_{i=k+1}^{k+n_p} [\mathbf{x}_p(i) - \mathbf{x}_r(i)]^T \mathbf{Q}_i [\mathbf{x}_p(i) - \mathbf{x}_r(i)] + \sum_{j=k}^{k+n_c-1} \mathbf{u}^T(j) \mathbf{R}_j \mathbf{u}(j) \\ \text{s.t. } \mathbf{x}_p(i+1) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_p(i), \mathbf{u}(i)), \quad i = k, \dots, k+n_c-1 \\ \mathbf{x}_p(i+1) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_p(i), \mathbf{u}(k+n_c-1)), \quad i = k+n_c, \dots, k+n_p-1 \end{aligned}$$

Mit den Vektoren

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_p(k) &= [\mathbf{x}_p(k+1 | k), \dots, \mathbf{x}_p(k+n_p | k)]^T \\ \mathbf{x}_r(k) &= [\mathbf{x}_r(k+1), \dots, \mathbf{x}_r(k+n_p)]^T \\ \mathbf{u}(k) &= [\mathbf{u}(k), \dots, \mathbf{u}(k+n_c-1)]^T \end{aligned}$$

und den dazugehörigen positiv definiten Wichtungsmatrizen $\mathbf{Q}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ($i = 1, \dots, n_p$) und $\mathbf{R}_j \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ($j = 0, \dots, n_c-1$). Weiterhin lässt sich das Optimierungsproblem um einfache Beschränkungen der Eingänge

$$\mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}(i) \leq \mathbf{u}_{max}, \quad i = k, \dots, k+n_c-1$$

und Zustandsbeschränkungen der Form

$$\mathbf{A} \mathbf{x}_p(i) \leq \mathbf{b} \quad i = k+1, \dots, k+n_p$$

erweitern.

3.2 Implementierung der Fahrspurregelung für das oTToCAR

Um die Theorie in die Praxis umzusetzen, muss der Algorithmus der MPC um die Erstellung einer Referenztrajektorie erweitert, sowie Vereinfachungen am Algorithmus vorgenommen werden. Denn der Schwachpunkt einer jeder modellprädiktiven Regelung ist die Laufzeit des Programms bei einer Online-Berechnung der nächsten Stellgröße. Somit muss ein Kompromiss zwischen Güte der Stellgröße und der Zeit zur Berechnung für diese gefunden werden.

3.2.1 Dimension der Optimierungsvariable

Als Systemeingänge für das Fahrzeugmodell sind der Lenkeinschlag der Räder $u_1 = \delta$ und das Motordrehmoment $u_2 = M_A$ vorhanden, demnach ergibt sich der Stellgrößenvektor zum Zeitpunkt k zu $\mathbf{u}(k) = [u_1(k), u_2(k)]^T$. Da sich die prädizierten Zustände \mathbf{x}_p aus den Gleichungsnebenbedingungen berechnen lassen, ergibt sich die Dimension der Optimierungsvariable also zu $2 \cdot n_c$. Je größer man n_c wählt, desto besser lässt sich z.B. die Geschwindigkeit in Abhängigkeit zur Entfernung und Krümmung einer bevorstehenden Kurve begrenzen oder Schwierigkeiten beim Durchfahren von S-Kurven bewältigen. Allerdings nimmt dadurch auch die Dimension der Optimierungsvariable zu, was dazu führt, dass die Grenzen der verfügbaren Rechenzeit zum Lösen des Optimierungsproblems während der Laufzeit schnell erreicht werden.

3.2.2 Referenztrajektorie

Mit einer auf dem Fahrzeug befestigten Kamera lässt sich die zu verfolgende Fahrbahn wahrnehmen. Diese Wahrnehmung liefert mit einer Rate von bis zu 50Hz eine Polylinie der erkannten Fahrbahnmarkierung projiziert auf die rechte Fahrspur. Diese Polylinie kann je nach erkannter Fahrbahn aus einer unterschiedlich Anzahl von Punkten mit variablem Abstand zu einander bestehen.

Um diese Polylinien als Referenztrajektorie für die MPC nutzen zu können, werden zu kurze Polylinien zunächst soweit extrapoliert, dass ein Vergleich zwischen Prädiktion zum Zeitschritt $k+n_p$ und Referenz in jedem Fall möglich ist. Anschließend werden die Koordinaten der Punkte auf der Polylinie als Funktion in Abhängigkeit der summierten Wegstrecke zwischen den Punkten (vom Auto ausgehend) hinterlegt, um diese

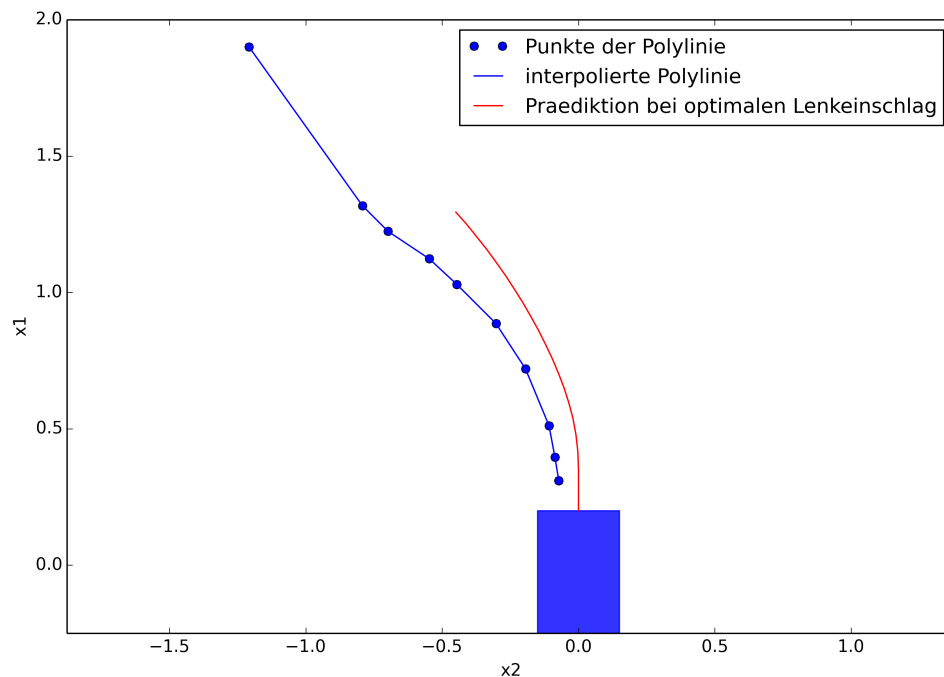


Abb. 10: Veranschaulichung der Referenztrajektorie und des prädizierten Verhaltens aufgetragen im Weltkoordinatensystem x_1 über x_2 in Meter

als Referenztrajektorie zu den dazugehörigen Werten aus der Prädiktion mit der zurückgelegten Wegstrecke $s = v * \Delta t * i$ interpolieren zu können. In Abb. 10 ist ein Beispiel einer Referenztrajektorie dargestellt.

Kostenfunktion angepasst $x_p(i) - x_r((i - k)\Delta t)$

Das Modell liefert als x_1 und x_2 die Position des Autos auf einer globalen Karte und den Gierwinkel dazu. Da bisher noch keine globale Karte implementiert ist, wird jedes Mal, wenn eine neue Polylinie vorhanden ist die Pseudo-Weltkarte auf das Vehicle Reference Frame zurück gesetzt (Fahrzeugposition und Gierwinkel auf 0 setzen.) Es ist dann kurzzeitig möglich, wenn keine neue Polylinie vorhanden ist, weiter an der letzten Referenztrajektorie weiter zu fahren, in dem man $x(k)$ mit Hilfe des Modells schätzt.

Referenz visualisieren: Plot der Punkte der Polylinie mit eingetragener Prädiktion des optimalen Lenkeinschlags

3.2.3 Vereinfachungen

Aufgrund zwischenzeitlich erschöpften Rechenkapazitäten auf dem Fahrzeug während der Entwicklungsphase, wurde der modellprädiktive Ansatz zunächst auf die einfachste denkbare Implementierung [[[?zurechtgeschnitten? zusammengestrichen]]]. Dabei wurde darauf verzichtet die Motorsteuergröße mit zu optimieren und der Stellhorizont für den Lenkeinschlag auf $n_c = 1$ begrenzt. Aufgrund überraschend guter Ergebnisse wurde an dieser Vereinfachung auch im Carolocup festgehalten.

Die Scheitelpunkt der approximierten Variablen zu berechnen. genau genug.

Kostenfunktion wie Parabel im Bereich unseres Interesses, an kann mit 3 Funktionsaufrufen den Schritt bestimmen, der zum Approximierten Optimum führt. Durch genügend hohe Wiederholrate ist das Ergebnis genau genug.

Die Vorgabe der Geschwindigkeit erfolgt dabei aus einer einfachen Abhängigkeit von der mittleren prädi-

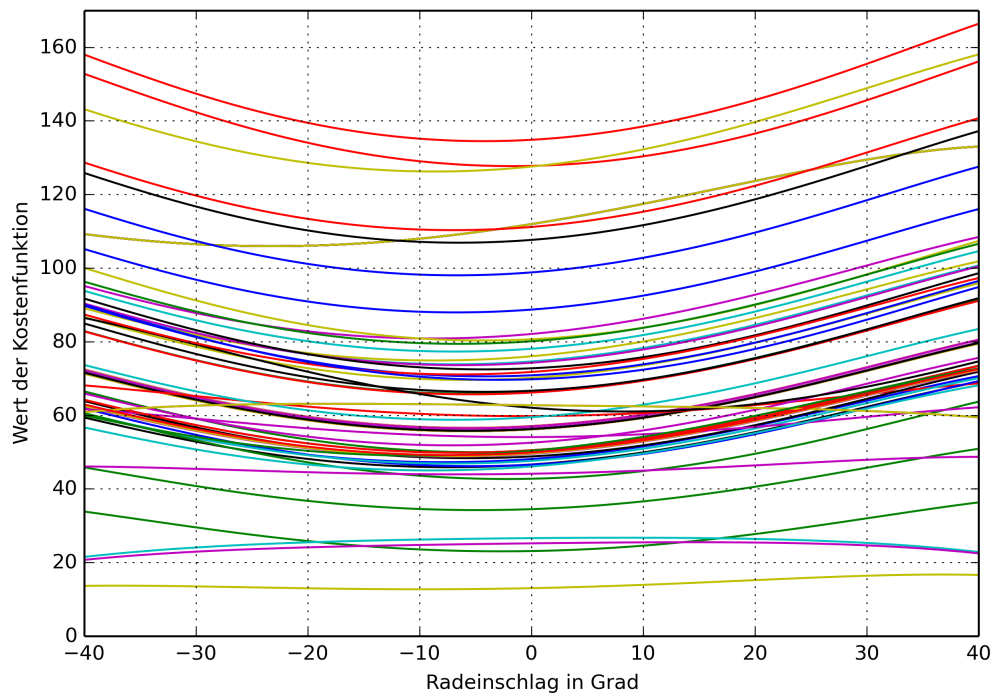


Abb. 11: Kostenfunktion in Abhängigkeit vom Radeinschlag in verschiedenen Fahrzeugpositionen

zierten Gierrate. Skalierbarkeit

Scheitelpunkt -> Newtonschritt der quadratischen Kostenfunktion

Lösen der Modellgleichungen mit konstanter geringer Geschwindigkeit, da für hohe Geschwindigkeiten noch keine passenden Modellparameter bestimmt werden konnten.

3.2.4 Stabilität

Um die Garantie zu haben, dass der Algorithmus immer gegen ein Optimum konvergiert, wurde die in implementierten Fall skalare Kostenfunktionen in der Parcoursfahrt in möglichst vielen denkbaren Positionen aufgenommen und überprüft, dass sich kein Fall ergibt, in dem das Optimierungsproblem in relevanten Bereich nicht convex ist. Ob sich Fälle ergeben, in denen die Kostenfunktion im relevanten Bereich der möglichen Lenkeinschläge nicht convex ist. Abb. 11 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Es ist zu erkennen, dass die Kostenfunktion nur in wenigen Ausnahmefällen einer nach unten geöffneten Parabel ähnelt. Der hierbei berechnete Lenkeinschlag wird nicht auf das System gegeben, stattdessen wird mit dem vorherig berechneten Lenkeinschlag weiter gefahren und auf die nächste Polylinie von der Wahrnehmung gewartet. [[[Bzw. an der alten Polylinie weiter gefahren]]]] Dank der relativ hohen Wiederholrate des Reglers stellen diese vereinzelt Ausfälle kein Problem dar.

3.2.5 Beschränkungen

Hinzufügen von

3.3 Spurwechsel

Polylinie um Fahrspurbreite verschieben, wenn Hindernis erkannt, wie in Abb. 12 dargestellt. MPC findet optimale Trajektorie zu den verschobenen Punkten. Ein Problem stellt dabei allerdings die Wahrnehmung dar, weil bei starken Einlenken die Fahrbahn aus dem Sichtfeld der Kamera verschwindet. Alternativ eine Trajektorie vorzugeben bei der die Fahrbahn weiterhin wahrgenommen wird, ist nicht denkbar, da Hindernisse nach einer Kurve oft erst spät erkannt werden und deshalb Spurwechsel auf möglichst kürzester Distanz nötig sind. Da das Verfolgen der zuletzt gesehenen Polylinie wegen Modellungenauigkeiten und begrenzter Länge der Polylinie nur kurzzeitig ausreichend gut funktioniert, schlägt diese Strategie immernoch häufig fehl. Dazu wird allerdings eine wirkliche globale Karte implementiert in der die komplette Referenztrajektorie eingetragen ist und die tatsächliche Position des Fahrzeugs im Weltkoordinatensystem anhand der erkannten Strecke besser geschätzt werden kann.

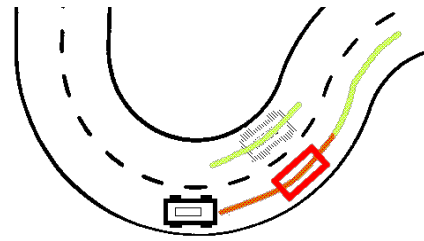


Abb. 12: Verschieben der Referenztrajektorie auf die linke Fahrspur bei erkanntem Hindernis

3.4 Dynamic Reconfigure

In der Vorbereitung auf den Wettkampf hat sich herausgestellt, dass die kurzen Testzeiten auf der Originalstrecke gut ausgenutzt werden muss. Dazu musste vorher extrahiert werden, welche Parameter entscheidenden Einfluss auf die Güte haben. Diese konnten dann online während der Fahrt mit dem dynamic reconfigure Paket getuned werden. (Übersicht Parameter)

3.5 Zukünftige Schritte

Geschwindigkeit, Zusätzlich soll in der weiteren Entwicklung der Stellhorizont n_c Erhöht werden um von der Prädiktion genauerer Information über die zukünftige Bewegung des Fahrzeuges zu bekommen. So wird erwartet dadurch schon eher vor Kurven bremsen und ebenfalls frühzeitiger aus Kurven heraus beschleunigen zu können, um eine Im Mittel höhere Geschwindigkeit zu erreichen.

Die Erstellung einer globalen Karte soll das Fahrverhalten außerdem robuster gegenüber Fehlwahrnehmungen der Fahrbahn machen und eine genauere Schätzung des aktuellen Zustands ermöglichen.

Literatur

- [1] A. PROYAS (REGIE): I, Robot. Film (2004). <http://www.imdb.com/title/tt0343818/>
- [2] CAROLOCUP: Carolo-Cup Regelwerk 2015. <https://wiki.ifr.ing.tu-bs.de/carolocup/system/files/Hauptwettbewerb2015.pdf>. – Homepage Carolo-Cup: www.carolo-cup.de
- [3] CAROLOCUP: Carolocup 2014. <https://wiki.ifr.ing.tu-bs.de/carolocup/wettbewerb/2014/bilder/2Trainingstag>
- [4] D. RINI ; S. SHAMSUDDIN ; A. YUHANIZ: Particle Swarm Optimization: Technique, System and Challenges. In: International Journal of Computer Applications (0975-8887) 14, Nr. 1. <http://ijcaonline.net/volume14/number1/pxc3872331.pdf>
- [5] DIE ZEIT: Dobrindt entwickelt Regeln für Roboterautos. <http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-02/alexander-dobrindt-selbstfahrende-autos-strassenverkehr>
- [6] H. WEISE: Das intelligent geführte Auto. In: Die Zeit <http://www.zeit.de/1992/35/das-intelligent-gefuehrte-auto>
- [7] J. MULLER: With Driverless Cars, Once Again It Is California Leading The Way. In: Forbes Magazin <http://www.forbes.com/sites/joannmuller/2012/09/26/with-driverless-cars-once-again-it-is-california-leading-the-way/>

-
- [8] J.-Y. BOUGUET: Camera Calibration Toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html
 - [9] M. BRAMBILLA (REGIE): Demolition Man. Film (1993). <http://www.imdb.com/title/tt0106697/>
 - [10] P. KOVESI: MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing. <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>
 - [11] S. EDDINS: Spatial transformations: Defining and applying custom transforms / MathWorks. <http://blogs.mathworks.com/steve/2006/08/04/spatial-transformations-defining-and-applying-custom-transforms/>. – Forschungsbericht
 - [12] S. TUOHY ; D.O’CUALAIN ; E. JONES ; M.GLAVIN: Distance Determination for an Automobile Environment using Inverse Perspective Mapping in OpenCV. In: ISSC <http://www.shanetuohy.com/fyp/Images/issc.pdf>
 - [13] SCIENTIF38: Winkelmesser. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Protractor_Rapporteur_Degree_V1.jpg
 - [14] T. ROSE ; M. TRESELER: Entwicklung einer Karosserie für das oTToCar.
 - [15] TAMIYA INC.: Tamiya TT-01 Type-E (TT-01E) Chassis. <http://www.rcscrapyard.net/de/tamiya-tt-01-type-e.htm>
 - [16] V. WIEDMEIER ; A. HIMMEL: oTToCAR, Interdisziplinäres Teamprojekt.
 - [17] Z. ZHANG: A Flexible New Technique for Camera Calibration / Microsoft Research, Microsoft Corporation. <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Papers/TR98-71.pdf>. – Forschungsbericht