

Prädiktive Blickregelung für einen redundanten humanoiden Roboterkopf

Predictive Gaze Control of a Redundant Humanoid Robot Head

Giulio Milighetti, KUKA Laboratories GmbH, Augsburg,
Alessandro De Luca, Dipartimento di Ingegneria Informatica, Automatica e Gestionale, Rom, Italien

Zusammenfassung Ein allgemeines Konzept für die Blickregelung eines redundanten Roboterkopfes wird präsentiert. Es basiert auf einem adaptiven Kalman-Filter, das den Zustand eines bewegten Zieles aufgrund der Positionsdaten schätzt, die von der im Kopf integrierten Stereokamera geliefert werden. Der Regler kombiniert eine Feedback- und eine Feedforward-Komponente, beide mit adaptiven Parametern, um eine optimale dynamische Antwort für beliebige unbekannte Zieltrajektorien zu gewährleisten. Für die Lösung der vorhandenen kinematischen Redundanz wird eine gewichtete Pseudoinverse eingesetzt. Die für die Berechnung der Gewichtungen realisierten Optimierungskriterien werden so ausgewählt, dass menschenähnliche Bewegungen des Kopfes erreicht werden können. Experimentelle Ergebnisse auf dem Kopf des humanoi-

den Roboters ARMAR-III werden präsentiert. ▶▶▶ **Summary** A general concept for the gaze control of a redundant humanoid robot head is presented. It is based on an adaptive Kalman filter that predicts the next state of the moving target, processing the position information provided by a head-mounted stereo camera. The trajectory tracking control at the task level combines a proportional feedback and a feedforward term. The gains of both control actions are adapted in order to provide optimal dynamic response for unknown arbitrary target trajectories. To exploit kinematic redundancy, a weighted pseudoinverse is realized that takes into account different optimization criteria, so that human-like joint motions are achieved. Experimental results on the head of the humanoid robot ARMAR-III are presented.

Schlagwörter Blickregelung, visuelle Verfolgung, prädiktive Regelung, adaptive Regelung, redundante Robotersysteme ▶▶▶
Keywords Gaze control, visual tracking, predictive control, adaptive control, redundant robotic systems

1 Einleitung

Forschungsaktivitäten im Bereich humanoider Robotik befassen sich mit der Entwicklung von Robotern mit menschlicher Gestalt, die den Menschen in seinem Alltagsleben unterstützen und menschenähnliche Geschicklichkeiten besitzen. Um ein solch anspruchsvolles Ziel erreichen zu können, sind Fortschritte in fachübergreifenden Bereichen wie z. B. Mechatronik, Regelungstechnik, Sensorik und künstliche Intelligenz notwendig. Zu diesem Zweck hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) den langfristigen Sonderforschungsbereich 588

„Humanoide Roboter“ gegründet [1], in dem verschiedene Aspekte der vielfältigen Interaktion zwischen Robotern und Menschen untersucht werden. Im Rahmen des Teilprojekts R2 werden am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) Überwachungs- und Regelungskonzepte erarbeitet, die den Roboter befähigen, anspruchsvolle Grundgeschicklichkeiten mit typischen menschlichen Verhaltensweisen zu bewältigen.

Wie der Mensch muss der Roboter für eine sichere physikalische sowie kognitive Interaktion seine

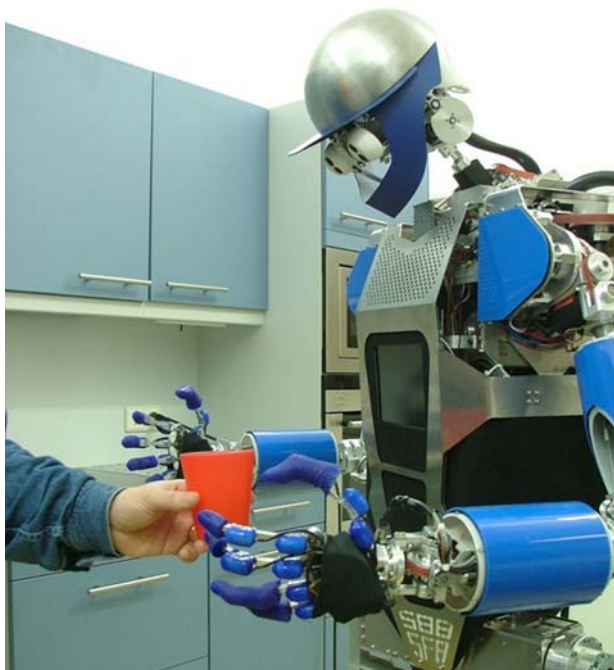


Bild 1 Der humanoide Roboter ARMAR-III beim Greifen eines Bechers.

Umgebung zunächst durch vielfältige Perzeptionsfähigkeiten wahrnehmen können. Zentrale Komponente für die Bewältigung komplexer Aufgaben mit zeitvarianten Randbedingungen ist hierfür das Sehen. Ein alltäglich benötigtes Verhalten ist z. B. die Verfolgung von bewegten Objekten durch die Ausrichtung des Blickes (engl. „Gaze Control“). Eine häufige Aufgabe, die eine solche Fähigkeit erfordert, ist z. B. das in Bild 1 dargestellte interaktive Greifen.

Das Ausrichten des Blickes auf ein Objekt im 3D-Raum ist eine zweidimensionale Aufgabe und benötigt daher nur zwei Freiheitsgrade des Roboters (engl. „Degree of Freedom“ – DoF) für ihre Ausführung. Falls zusätzliche Freiheitsgrade in der Roboterkinematik zur Verfügung stehen, wird der Roboter für diese Aufgabe redundant [2].

Viele der entwickelten humanoiden Roboter besitzen daher Köpfe mit nur zwei DoF und fixierten Augen [3–5]. Köpfe mit menschenähnlichen Bewegungsfähigkeiten wurden hauptsächlich für Forschungszwecke im Bereich emotionaler Mensch-Roboter-Interaktion [6;7] oder kognitiver Prozesse [8–10] angewendet.

Des Weiteren werden Roboterköpfe mit einer größeren Anzahl von Freiheitsgraden eingesetzt, um neurophysiologische Modelle zu untersuchen und zu validieren (siehe z. B. [11; 12]). Allerdings wird hierzu nur eine reduzierte Anzahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade verwendet und es ist in der Regel keine allgemeine Verfolgungsfunktionalität (engl. „Tracking“) implementiert.

Die Ansätze in [13] und [14] basieren auf Betrachtungen aus biologischen Experimenten. In beiden Fällen wird die kinematische Redundanz des 4-DoF-Kopfes durch die

Abbildung verschiedener menschlicher Bewegungsmuster gelöst. Aufgrund der sehr spezifischen Entscheidungseinheit, die diese Muster selektiert, ist aber die präsentierte Methode nicht einfach auf Köpfe mit beliebigen Freiheitsgraden erweiterbar.

In [15] wird der Mangel an zusätzlichen Freiheitsgraden im 2-DoF-Kopf durch die Gelenke im Roboterkörper kompensiert. Dabei werden Optimierungskriterien wie die Minimierung der Bewegung von Gelenken mit höherer Massenträgheit oder die Maximierung des Abstands zu ihren mechanischen Grenzen berücksichtigt. Der Einsatz von entfernt liegenden Gelenken führt zu weniger natürlichen Bewegungen und ineffizienten Lösungen.

Letztlich wurde in [16] ein neuartiger Ansatz für den ARMAR-III-Kopf mit 7 DoF vorgestellt. Zwei virtuelle prismatische Gelenke wurden eingeführt, die die zwei Augen mit dem zu verfolgenden Ziel verbinden. Die zwei zusätzlichen DoF erweitern allerdings auch den Aufgabenraum (engl. „Task Space“) um einen zusätzlichen Freiheitsgrad, für den neue Zwangsbedingungen erfüllt werden müssen.

In diesem Beitrag wird ein generisches Konzept für die Blickregelung eines redundanten Roboterkopfes vorgestellt und auf dem Kopf des ARMAR-III (siehe Abschnitt 2) validiert. Das zu verfolgende Zielobjekt besitzt eine unbekannte und zufällige Trajektorie mit hoher Dynamik. Das in Abschnitt 3 präsentierte Regelungskonzept beinhaltet eine Feedback-Komponente proportional zum Fehler und eine Feedforward-Komponente basierend auf der mittels eines Kalman-Filters prädizierten Bewegung des Objektes. Die Redundanz des Kopfes wird dazu verwendet, die inverse Kinematik mittels einer gewichteten Pseudoinversen der Jakobi-Matrix zu lösen. Dazu werden lokale Optimierungskriterien eingesetzt mit dem Ziel, menschenähnliche Bewegungen zu erreichen. Die Leistungen des entwickelten Konzeptes werden schließlich anhand einiger experimenteller Ergebnisse auf dem ARMAR-III-Kopf in Abschnitt 4 beispielhaft präsentiert.

2 Versuchsaufbau

Der für die Validierung des erarbeiteten Blickregelungskonzeptes eingesetzte humanoide Roboterkopf wurde im Rahmen des SFB 588 entwickelt. Er wurde dafür entworfen, verschiedene Perzeptionsaufgaben im Bereich der Objekterkennung und der Mensch-Roboter-Interaktion zu realisieren, sowohl als Teil des humanoiden Roboters ARMAR-III als auch als unabhängig operierender Roboterkopf [17] (siehe Bild 2a).

Der Kopf hat sieben Freiheitsgrade und seine komplette kinematische Struktur ist schematisch in Bild 2b dargestellt. Die Halsbewegung ist durch vier Gelenke realisiert (unterer Nickwinkel q_1 , Rollwinkel q_2 , Gierwinkel q_3 und oberer Nickwinkel q_4), die Augenbewegung durch die restlichen drei Gelenke (ein gemeinsamer Neigungswinkel q_5 und zwei entkoppelte Rotationen um die vertikale Achse q_6 und q_7). Alle sieben Gelenke werden mit Gleichstrommotoren angetrieben.

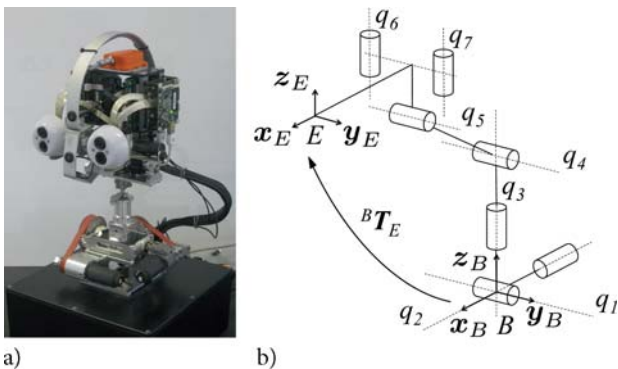


Bild 2 Der Kopf des humanoiden Roboters ARMAR-III. (a) Stand-Alone-Roboterkopf; (b) Komplette Kopfkine-matik.

Das Vision-System besteht aus zwei Kamera-paaren, jeweils mit Linsen für den Nah- und Weitbereich. Die eingesetzten Dragonfly[®]2-Kameras können Farbbilder mit einer Rate bis zu 60 Hz erfassen und verfügen über eine Bildauflösung von 640 × 480 Pixel. Sie werden über eine FireWire-Schnittstelle an die Kopfregelung ange-bunden [18]. Des Weiteren ist der Kopf mit einem 6-kanäligen akustischen System für die 3D-Lokalisierung von Geräuschquelle sowie einer inertialen Messeinheit ausgerüstet.

Das Kopfregelungsprogramm ist mit Hilfe der MCA2-Architektur implementiert [19] und läuft auf einem Linux-Rechner (Debian Kernel 2.6.8) mit einem 2 GHz Pentium 4 Prozessor und 2 GB RAM.

Die Eingangsdaten für die Kopfregelung werden durch eine am Fraunhofer IOSB entwickelte Bildverarbeitungs-software generiert. Das Zielobjekt wird anhand seiner Farbinformationen im HSV-Farbraum erkannt und mit Hilfe der Stereotriangulation lokalisiert [20]. Dazu wer-den in dieser Arbeit die Nahbereichkameras eingesetzt. Die berechneten Positionen werden dann jede 50 ms dem Regelungsrechner via UDP-Netzwerkverbin-dung gesendet. Die übergeordnete Regelungsschleife läuft mit einem Takt $T = 30$ ms und liefert den untergeordneten Servoreglern, die mit 1 kHz arbeiten, die Stellgeschwin-digkeiten.

3 Regelungskonzept

Ziel der Regelung ist eine robuste visuelle Verfolgung eines bewegten Zieles mit den Roboteraugen unter Ver-wendung aller verfügbaren Freiheitsgrade des Kopfes, um menschenähnliche Bewegungen zu erzielen. Das hierfür entwickelte Regelungskonzept ist in Bild 3 dargestellt.

Führungsgröße des Regelkreises sind die zwei Winkel θ , die die Blickrichtung definieren. Der entworfene Regler beinhaltet eine Feedback- sowie eine prädiktive Feedforward-Komponente: die Feedback-Komponente gewährleistet im statischen Fall die Konvergenz der Regel-abweichung gegen Null, während der Feedforward-Anteil die zukünftige Bewegung des Zielobjektes berücksichtigt. Dadurch wird eine systematische Verzögerung bei der Verfolgung des bewegten Objekts mit dem Kopf ver-mieden. Die aktuelle kartesische Zielposition $p_t^f(k)$ zum Zeitpunkt $t = kT$ wird zusammen mit der nächsten Posi-tion $p_t^f(k+1)$ zum Zeitpunkt $t = (k+1)T$ mittels eines Kalman-Filters anhand der von der Stereokamera ge-lieferten Messungen geschätzt. Alle Positionen werden einheitlich im Kopfbasiskoordinatensystem dargestellt. Die kinematische Redundanz des Roboters hinsichtlich der gegebenen Aufgabe wird mittels einer gewichteten Pseudoinversen der Jakobi-Matrix und der Einführung von Eigenbewegungen gelöst.

Die Hauptkomponenten des erarbeiteten Regelungs-konzepts werden im Folgenden dargestellt.

3.1 Kopfkine-matik

Die Blickrichtung des Roboters (engl. „Gaze Direction“) ist als der Einheitsvektor g definiert, der vom Ursprung des Koordinatensystems im Endeffektor (linkes Auge) zum Mittelpunkt des Zielobjektes zeigt. Wie in Bild 4 dargestellt, wird diese Richtung durch den zweidimensionalen Vektor $\theta = (\theta_{\text{pan}} \ \theta_{\text{tilt}})^T \in (-\pi/2, \pi/2) \times (-\pi/2, \pi/2)$ wie folgt beschrieben:

$$g = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{pan}} \cos \theta_{\text{tilt}} \\ \sin \theta_{\text{pan}} \cos \theta_{\text{tilt}} \\ \sin \theta_{\text{tilt}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Da die Grenzwerte $\pm\pi/2$ des Neigungswinkels θ_{tilt} ausgeschlossen werden können, führt die angegebene

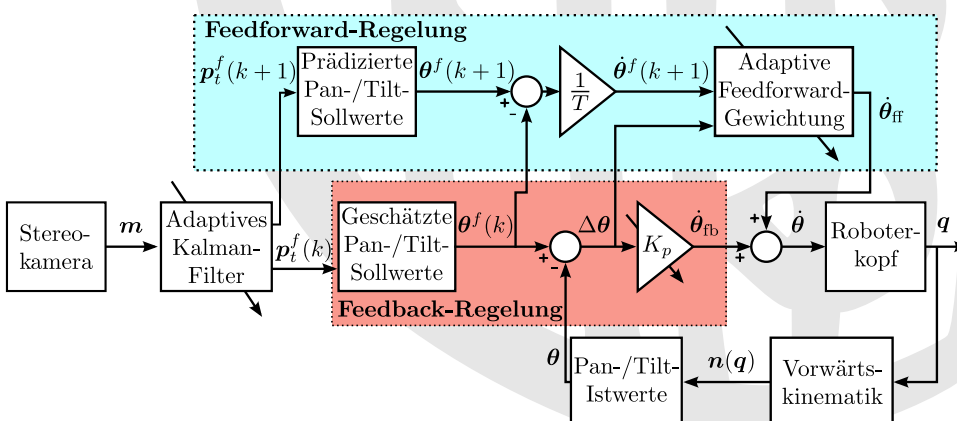


Bild 3 Erarbeitete Regelungsstruktur.

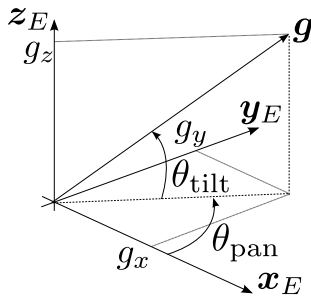


Bild 4 Definition von Pan- und Tilt-Winkeln.

Darstellung zu keiner Singularität. Die Richtungswinkel werden berechnet als:

$$\theta_{\text{pan}} = \text{atan} \left(\frac{g_y}{g_x} \right), \quad \theta_{\text{tilt}} = \text{atan} \left(\frac{g_z}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}} \right). \quad (2)$$

Als Vektor n , der die Ausrichtung des Roboterkopfes beschreibt (engl. „Pointing Direction“), wird die x -Achse des Endeffektor-Koordinatensystems gewählt, die durch das kinematische Modell des Kopfes bestimmt werden kann.

Um auf die Implementierung einer Online-Kalibrierungsmethode für die Stereokamera verzichten zu können, werden beide Augen immer parallel gehalten und ihre unabhängige Bewegung vermieden. Auf diese Art und Weise ergibt sich ein vereinfachtes kinematisches Modell mit nur 6 DoF (siehe Bild 5), das jedoch die Allgemeinheit des Konzepts nicht beschränkt.

Die Vorwärtskinematik des Kopfes ist dann definiert durch die homogene Matrix

$${}^B T_E(q) = {}^B T_0 {}^0 T_6(q) {}^6 T_E = \begin{pmatrix} n(q) & s(q) & a(q) & p(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

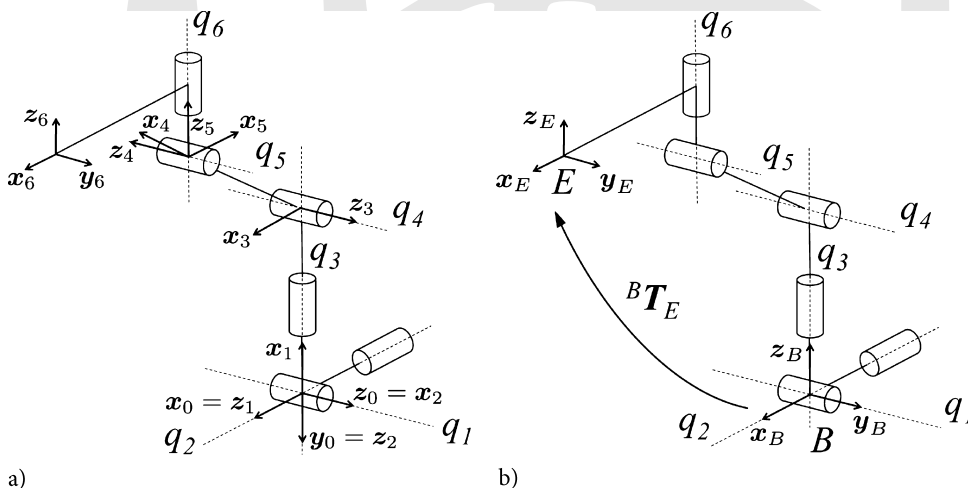


Bild 5 Vereinfachte Kinematik des ARMAR-III-Kopfes. (a) DH-Koordinatensysteme; (b) Globale Koordinatensysteme.

Tabelle 1 Denavit-Hartenberg-Parameter für den ARMAR-III-Kopf.

Gelenk	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$-\pi/2$	0	0	q_1
2	$\pi/2$	0	0	q_2
3	$\pi/2$	0	$d_3 (< 0)$	q_3
4	π	a_4	0	q_4
5	$\pi/2$	0	0	q_5
6	0	a_6	0	q_6

Hierbei ist ${}^0 T_6(q)$ aus den Denavit-Hartenberg-Parametern in Tabelle 1 abzuleiten, ${}^B T_0$ ist eine feste Rotation von $-\pi/2$ um die x_B -Achse und ${}^6 T_E = I$.

Der Kopf ist genau auf das Ziel ausgerichtet wenn $n(q) = g$. Dem Ansatz der „Task Function“ folgend (siehe z. B. [21; 22] für Visual-Servoing-Anwendungen), sei $n(q)$ aus Gleichung (3) entnommen und $g = n(q)$ in Gleichung (2) ersetzt. Die Kinematik der Aufgabe ist damit gegeben durch

$$\theta = f(q) = \begin{pmatrix} \theta_{\text{pan}}(q) \\ \theta_{\text{tilt}}(q) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Die dazugehörige differentielle Kinematik ist

$$\dot{\theta} = \frac{\partial f(q)}{\partial q} \dot{q} = J(q) \dot{q}. \quad (5)$$

Hierbei werden die Elemente J_{ij} der 2×6 Jacobi-Matrix J wie folgt berechnet:

$$J_{ij} = \frac{\partial \theta_i}{\partial q_j}, \quad i = \{\text{pan, tilt}\}, \quad j = 1, \dots, 6. \quad (6)$$

Dadurch ergibt sich, dass der Redundanzgrad des Roboterkopfes für die vorgegebene Ausrichtungsaufgabe gleich vier ist.

3.2 Adaptive Kalman-Filter

Kalman-Filter wurden in der Vergangenheit weitgehend zur Unterdrückung des Messrauschens von Stereokame-

ras, zur Bewältigung der Asynchronität der Messwerte sowie zur Schätzung der Bewegung des Zieles eingesetzt (siehe z. B. [23; 24]). Diese Idee wird in diesem Beitrag wieder aufgenommen und es wird ein lineares zeitdiskretes Kalman-Filter (vgl. [25, p. 362]) implementiert. Da versucht wird, ein Ziel entlang einer a priori unbekannt Trajektorie mit hoher Dynamik zu verfolgen, stellt die Auswahl des hinterlegten Modells einen sehr wichtigen Aspekt für den Erfolg des Filters dar. Nach zahlreichen experimentellen Untersuchungen wurde ein Modell mit konstanter Beschleunigung ausgewählt [26]. Sei \mathbf{m} der Vektor der Kameramesswerte und sei der Zustandsvektor definiert als

$$\xi = (x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ z \ \dot{z})^T. \quad (7)$$

Das lineare zeitdiskrete Modell der Bewegung ist dann gegeben durch

$$\xi(k+1) = \mathbf{A} \xi(k) + \mathbf{v}(k) \quad (8)$$

$$\mathbf{m}(k) = \mathbf{H} \xi(k) + \mathbf{w}(k). \quad (9)$$

Hierbei sind die Übergangsmatrix $\mathbf{A} = \text{diag}\{\mathbf{A}_i\}$ und die Beobachtungsmatrix $\mathbf{H} = \text{diag}\{\mathbf{H}_i\}$ wie folgt definiert:

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad i = x, y, z, \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_i = (1 \ 0 \ 0), \quad i = x, y, z. \quad (11)$$

Mess- und Prozessrauschen \mathbf{w} und \mathbf{v} werden als weißes normalverteiltes Gauß'sches Rauschen mit Mittelwert Null angenommen und durch die diagonalen Blockkovarianzmatrizen \mathbf{R} bzw. \mathbf{Q} beschrieben. Die Kovarianzmatrix des Prozessrauschens $\mathbf{Q} = \text{diag}\{\mathbf{Q}_i\}$ ist anhand der Standardabweichung σ_{Q_i} definiert durch (siehe [27])

$$\mathbf{Q}_i = \sigma_{Q_i}^2 \begin{pmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/2 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{pmatrix}, \quad i = x, y, z. \quad (12)$$

Die Gleichungen (8)–(9) werden sowohl für die Schätzung der aktuellen Zielposition $\mathbf{p}_t^f(k) = (\hat{x}(k) \ \hat{y}(k) \ \hat{z}(k))^T$ zum Zeitpunkt $t = kT$ als auch für die Prädiktion der zukünftigen Zielposition $\mathbf{p}_t^f(k+1) = (\hat{x}(k+1) \ \hat{y}(k+1) \ \hat{z}(k+1))^T$ zum Zeitpunkt $t = (k+1)T$ in das Kalman-Filter eingesetzt.

Um die Robustheit der Schätzung gegenüber Trajektorien mit variabler Dynamik zu erhöhen, wird eine Online-Adaption der Matrix \mathbf{Q} eingeführt. Durch Änderung der Werte von σ_{Q_i} wird die Größenordnung von \mathbf{Q} und damit auch die Zuverlässigkeit des Modells beeinflusst: je niedriger diese Werte sind, desto zuverlässiger kann das Bewegungsmodell (8) angenommen werden. Das Adaptionsgesetz wird als Funktion der Abweichung

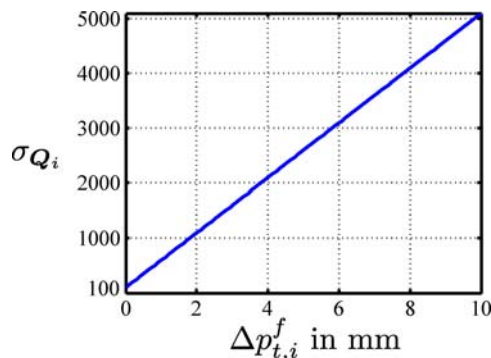


Bild 6 Adaptionsgesetz für die Standardabweichungen in (13).

$\Delta \mathbf{p}_t^f = \mathbf{p}_t^f(k) - \mathbf{p}_t^f(k-1)$ zwischen der aktuellen Schätzung und der zuvor prädizierten Position gewählt:

$$\sigma_{Q_i} = a_{\sigma_Q} \left| \Delta p_{t,i}^f \right| + b_{\sigma_Q}, \quad i = x, y, z. \quad (13)$$

Das resultierende Profil ist in Bild 6 zu sehen.

3.3 Regelgesetz

Der Blick des Roboters wird durch die Stellgröße θ in (5) geregelt, die sich aus einer Feedback- und einer Feedforward-Komponente zusammensetzt:

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_{fb} + \dot{\theta}_{ff}. \quad (14)$$

Proportionale Feedback-Regelung

Ziel der Feedback-Regelung ist das Ausregeln des aktuellen Ausrichtungsfehlers $\Delta \theta$, der durch die Differenz zwischen dem Sollwert θ^f und dem Istwert θ gebildet wird. θ^f wird aus der geschätzten Zielposition \mathbf{p}_t^f berechnet, θ ist aus der aktuellen Kopfposition \mathbf{q} zu bestimmen. Namentlich wird der Wert θ^f aus Gleichung (2) mit $\mathbf{g} = \mathbf{g}^f / \|\mathbf{g}^f\|$ ermittelt. Hierbei wird $\mathbf{g}^f = \mathbf{p}_t^f - \mathbf{p}(\mathbf{q})$ unter Verwendung von Gleichung (3) berechnet. Der Fehler $\Delta \theta$ kann sowohl aus einem transienten Positionierungsfehler in Bezug auf ein statisches Ziel als auch aus dem Linearisierungsfehler, der durch die Online-Inversion der differentiellen Kinematik während der Bewegung entsteht, verursacht werden.

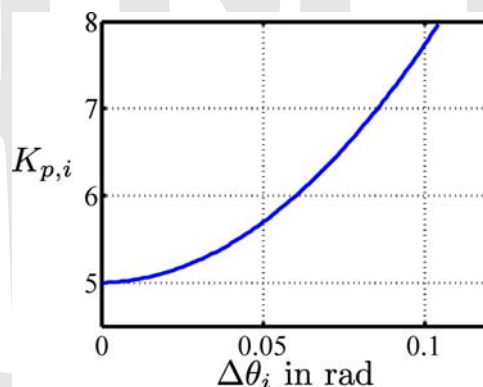


Bild 7 Adaptionsgesetz für die proportionale Verstärkung $K_{p,i}$ in (16).

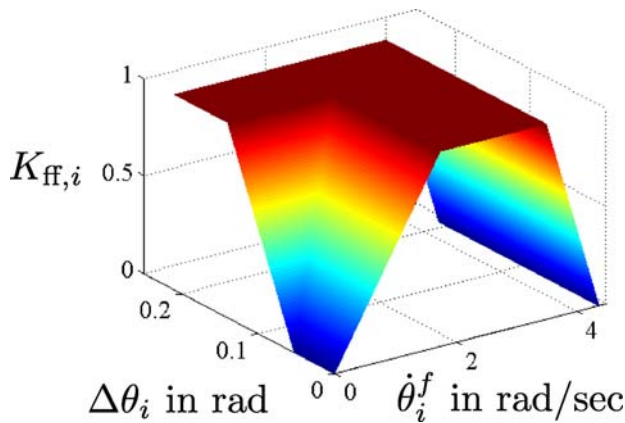


Bild 8 Gewichtungsfunktion für Feedforward-Verstärkung $K_{ff,i}$ in (17).

Die zeitdiskrete Implementierung des Reglers ist gegeben durch

$$\dot{\theta}_{fb}(k) = K_p \Delta\theta = K_p (\theta^f(k) - \theta(k)), \quad (15)$$

mit der diagonalen 2×2 Verstärkungsmatrix $K_p > 0$.

Eine adaptive Verstärkung wird eingeführt, um eine zeitoptimale Antwort des Systems sowohl für große Ausrichtungsfehler (noch weit weg von der Solltrajektorie), als auch für kleine Ausrichtungsfehler (die Trajektorie wird bereits verfolgt) zu gewährleisten. Dementsprechend wird das Adaptionsgesetz als quadratische Funktion des skalaren Winkelfehlers definiert:

$$K_{p,i} = a_{K_p} \Delta\theta_i^2 + b_{K_p} \Delta\theta_i + c_{K_p}, \quad i = \{\text{pan, tilt}\}. \quad (16)$$

Das resultierende ausgewählte Profil ist in Bild 7 zu sehen.

Gewichtete Feedforward-Regelung

Der Feedforward-Anteil des Reglers verwendet den Ausrichtungsvektor $\theta^f(k+1)$, der sich aus der prädizierten Zielposition $p_i^f(k+1)$ ergibt, um die Bewegung des Zielobjektes vorauszusehen und dadurch die systematische Verzögerung des Kopfes bei der Verfolgung zu kompensieren. Er ist wie folgt definiert:

$$\dot{\theta}_{ff}(k) = K_{ff} \frac{\theta^f(k+1) - \theta^f(k)}{T}. \quad (17)$$

Die diagonale 2×2 Verstärkungsmatrix K_{ff} wird eingeführt, um mit ungenaueren Prädiktionen zurecht zu kommen, die zur Instabilität führen könnten. Die adaptive Gewichtung schaltet den Feedforward-Anteil (getrennt für die zwei Pan- und Tilt-Winkel, d.h. $K_{ff,i} \in [0, 1]$) in den folgenden zwei Situationen aus (siehe Bild 8):

- wenn die Objektgeschwindigkeit $\dot{\theta}_i^f(k+1)$ als *gering* und der Ausrichtungsfehler $\Delta\theta_i$ als *klein* geschätzt wird. Das heißt, das Objekt bewegt sich langsam und der Feedback-Anteil sollte ausreichend sein, um eine genaue Verfolgung zu gewährleisten;
- wenn die Objektgeschwindigkeit $\dot{\theta}_i^f(k+1)$ als *hoch* geschätzt wird und für *jeden* Wert des Ausrichtungs-

fehlers $\Delta\theta_i$. Die Geschwindigkeiten sind in diesem Fall zu hoch, um realistisch zu sein und werden deshalb einem Fehler in der Schätzung bzw. in der Messung zugeordnet.

3.4 Inverse Differentielle Kinematik

Nachdem die Pan- und Tilt-Stellgeschwindigkeit mit (14) berechnet werden, können auch die Gelenkgeschwindigkeiten \dot{q} durch die inverse differentielle Kinematik (5) bestimmt werden. Da die Jakobi-Matrix in (6) nicht quadratisch ist, wäre die einfachste Vorgehensweise, die Lösung, die die Norm der Gelenkgeschwindigkeiten minimiert, mittels der Pseudoinverse zu berechnen:

$$\dot{q} = J^\dagger(q) (\dot{\theta}_{fb} + \dot{\theta}_{ff}). \quad (18)$$

Allerdings berücksichtigt diese Lösung keine physikalischen Grenzen im Gelenkraum und führt nicht unbedingt zu menschenähnlichen Bewegungen. Deshalb wird stattdessen eine geeignete gewichtete Pseudoinverse eingesetzt, d.h.

$$\dot{q} = \dot{q}_W = J_W^\dagger(q) (\dot{\theta}_{fb} + \dot{\theta}_{ff}), \quad (19)$$

wobei

$$J_W^\dagger(q) = W^{-1}(q) J^T(q) (J(q) W^{-1}(q) J^T(q))^\dagger \quad (20)$$

mit der diagonalen konfigurationsabhängigen 6×6 Gewichtungsmatrix $W > 0$. Die Pseudoinversion von J_W wird durch eine leicht modifizierte Version des gedämpften SVD-Algorithmus (engl. „Singular Value Decomposition“) ausgeführt, der für die Berechnung von J^\dagger üblicherweise eingesetzt wird.

Die diagonalen Elemente $W_i \in [1, \infty)$ von W werden mit Hilfe folgender Kriterien definiert:

- *Vermeidung von Gelenkpositionsgrenzen.* Die Gelenke sollten so nah wie möglich am Mittelpunkt ihres (teilweise nicht symmetrischen) Arbeitsbereichs $[q_{\min,i}, q_{\max,i}]$, $i = 1, \dots, 6$ arbeiten. Da die Kostenfunktion nach [28]

$$H(q) = \sum_{i=1}^6 \frac{(q_{\max,i} - q_{\min,i})^2}{4 (q_{\max,i} - q_i) (q_i - q_{\min,i})} = \sum_{i=1}^6 H_i(q_i), \quad (21)$$

mit der Nähe zu den Positionsgrenzen assoziiert werden kann, kann ihr Gradient $\nabla_q H = (\partial H / \partial q)^T$ für die Gewichtung der Pseudoinversen verwendet werden. Mit der Unterscheidung, ob die Gelenke sich zum Zeitpunkt $t = (k-1)T$ der Grenzen entgegen oder von ihr weg bewegen, werden die Gewichtungen W_i^{pos} definiert als

$$W_i^{\text{pos}} = \begin{cases} 1 + \left| \frac{\partial H_i}{\partial q_i} \right| & \text{if } \dot{q}_i(k-1) (q_i(k) - \bar{q}_i) \geq 0 \\ 1 & \text{else,} \end{cases} \quad (22)$$

wobei $\bar{q}_i = q_{\max,i} - q_{\min,i}$ der Mittelpunkt des Arbeitsbereichs des Gelenks i ist.

- *Vermeidung von Gelenkgeschwindigkeitsgrenzen.* Dieses Kriterium dient dazu, die Gelenkgeschwindigkeiten so niedrig wie möglich zu halten, indem sie von ihren symmetrischen Grenzen $[-\dot{q}_{\max,i}, \dot{q}_{\max,i}]$ ferngehalten werden. Ähnlich zu (21) wird die Kostenfunktion definiert als

$$U(\dot{\mathbf{q}}) = \sum_{i=1}^6 \frac{\dot{q}_{\max,i}^2}{\dot{q}_{\max,i}^2 - \dot{q}_i^2} = \sum_{i=1}^6 U_i(\dot{q}_i), \quad (23)$$

und die entsprechenden Gewichtungen W_i^{vel} werden unter Berücksichtigung der vorherigen Geschwindigkeitswerte berechnet mit

$$W_i^{\text{vel}} = \begin{cases} \left| \frac{\partial U_i}{\partial \dot{q}_i} \right| & \text{if } \dot{q}_i(k-1)\dot{q}_i(k-2) \geq 0 \\ 0 & \text{else.} \end{cases} \quad (24)$$

- *Gelenkpriorisierung.* Für die Realisierung von menschenähnlichen Bewegungen und um gleichzeitig die höhere Geschwindigkeit der Augen auszunutzen (wie bei sakkadischen Bewegungen), kann eine Priorisierung der Gelenkbewegung durch den Faktor $f_i^W \geq 1$ realisiert werden. Kombiniert mit (22) und (24) ergeben sich die diagonalen Elemente der Gewichtungsmatrix \mathbf{W} aus

$$W_i = f_i^W (W_i^{\text{pos}} + W_i^{\text{vel}}), \quad i = 1, \dots, 6. \quad (25)$$

Je größer f_i^W ist, desto niedriger ist die Priorität der Bewegung des Gelenks i .

Letztlich wird die Ausführung von Eigenbewegungen $\dot{\mathbf{q}}_0$ aktiviert, sobald der Kopf fast zum Stehen gekommen ist. Auf diese Art und Weise kann eine „bequemere“ Haltung im statischen (oder quasistatischen) Zustand erreicht werden, die die Ausrichtung der Augen nicht beeinflusst. Dem menschlichen Verhalten folgend, werden die Gelenke in die Nähe des Mittelpunkts ihres Arbeitsbereichs gebracht. Die Kostenfunktion, die dafür lokal minimiert werden muss, ist gegeben durch

$$H_0(\mathbf{q}) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{\max,i} - q_{\min,i}} \right)^2. \quad (26)$$

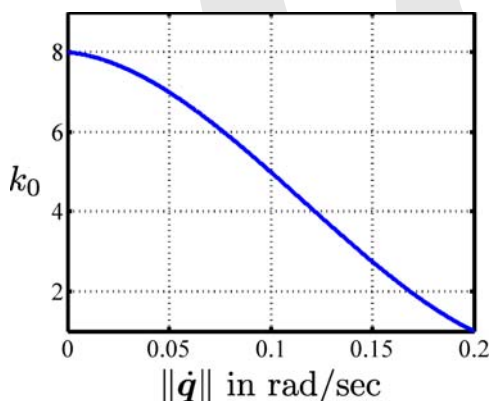


Bild 9 Aktivierungsfaktor für die Eigenbewegungen in (28).

Die Gelenkgeschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}_W - k_0 \dot{\mathbf{q}}_0$ werden dann mit (19) und mittels eines projizierten Gradients (siehe z. B. [2]) berechnet als

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_W^\dagger(\mathbf{q}) (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{fb}} + \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{ff}}) - k_0 (\mathbf{I} - \mathbf{J}_W^\dagger(\mathbf{q})\mathbf{J}(\mathbf{q})) \nabla_{\mathbf{q}} H_0(\mathbf{q}). \quad (27)$$

Der skalare Faktor $k_0 \geq 0$, der die Eigenbewegungen aktiviert, wird als kubische Funktion der Gelenkgeschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}}_W$ gewählt:

$$k_0 = a_{k_0} \|\dot{\mathbf{q}}_W\|^3 + b_{k_0} \|\dot{\mathbf{q}}_W\|^2 + c_{k_0} \|\dot{\mathbf{q}}_W\| + d_{k_0}. \quad (28)$$

Ein beispielhaftes Profil ist in Bild 9 dargestellt.

4 Experimentelle Ergebnisse

Um die Güte des entwickelten Regelungskonzepts zu bewerten, werden im Folgenden einige repräsentative Ergebnisse dargestellt. Für weitere Details wird auf [29] verwiesen.

Die für die präsentierten Experimente betrachtete Trajektorie (siehe Bild 10) bestand aus ellipsenförmigen Rotationen mit der Hauptachse $r \approx 0,4$ m gefolgt von linearen Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen entlang eines Segments der Länge $l \approx 1,15$ m. Der komplette Pfad lag ungefähr in der Ebene parallel zu (y_B, z_B) mit einem Abstand $d_x \approx 1,10$ m zum Roboterkopf. Die Bewegung wurde per Hand mit variierender Geschwindigkeit durchgeführt. Die maximale erreichte Geschwindigkeit des Zieles (ein Becher) betrug ca. 2 m/s.

Zuerst wurde der Kopf nur anhand der Feedback-Komponente geregelt. Für beide Pan- und Tilt-Winkel wurden konstante Verstärkungen $K_{p,i} = 5 \text{ s}^{-1}$ eingesetzt. Die Standardabweichungen für die Messkovarianzmatrix des Kalman-Filters wurden nach umfassenden Vorversuchen für x , y und z wie folgt gewählt: $\sigma_R = (15,6, 8,8, 5,0) \text{ mm}$. Außerdem wurde $\mathbf{W} = \mathbf{I}$ für die Pseudoinversion angenommen und im SVD-Algorithmus ein Dämpfungsfaktor $\lambda = 0,1$ verwendet.

Im zweiten Schritt wurde der Feedforward-Anteil mit $K_{\text{ff},i} = 1$ hinzugefügt. Der Vergleich der Ausrichtungsfehler in Bild 11 zeigt eindeutig, dass eine

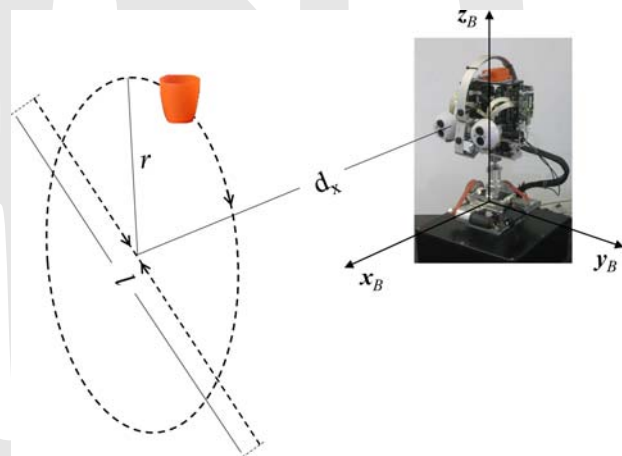


Bild 10 Solltrajektorie für die experimentelle Validierung.

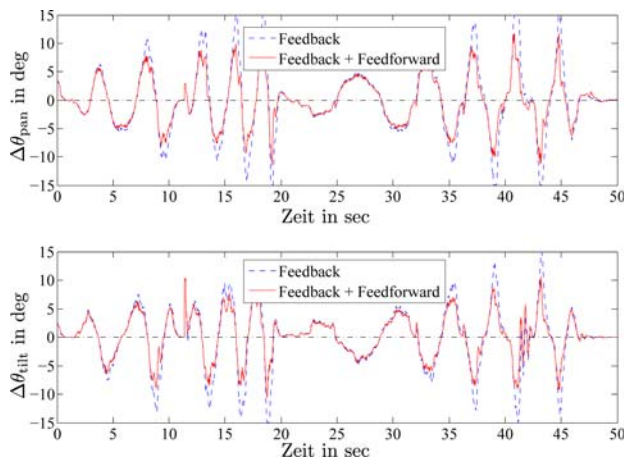


Bild 11 Ausrichtungsfehler mit und ohne Feedforward-Regelung.

Feedforward-Regelung die Verzögerung in der Verfolgung wie erwartet reduziert. Dieses Verhalten ist deutlich bei Änderungen der Bewegungsrichtung zu sehen, bei denen der Fehler um ca. 5° sinkt.

Eine zusätzliche Verbesserung wurde durch die Adaption der beiden Reglerparameter K_p und K_{ff} (siehe Bilder 7–8) erreicht. Die erzielten Ausrichtungsfehler sind in Bild 12 dargestellt. Wie im vorherigen Fall, kann die Differenz zwischen den zwei Abläufen besonders bei Richtungsänderungen und bei hohen Geschwindigkeiten erkannt werden, bei denen der maximale Fehler um weitere 3° reduziert wird.

Bild 13 zeigt die zwei verschiedenen Verhalten der Gelenke mit und ohne Verwendung der gewichteten Pseudoinversion, die zur Lösung der kinematischen Redundanz des Kopfes in Abschnitt 3.4 eingeführt wurde. Aufgrund der verwendeten Gelenkpriorisierung (d. h., $f_1^W = f_2^W = f_3^W = 4$, $f_3^W = 3$, und $f_5^W = f_6^W = 1$ in (25)) nimmt die Bewegung der zwei Augengelenke q_5 und q_6 deutlich zu, während das zweite Gelenk seine untere Positionsgrenze nicht erreicht.

Letztlich zeigt Bild 14 den Vorteil der Einführung von Eigenbewegungen. Bild 14a zeigt die Konfiguration, die

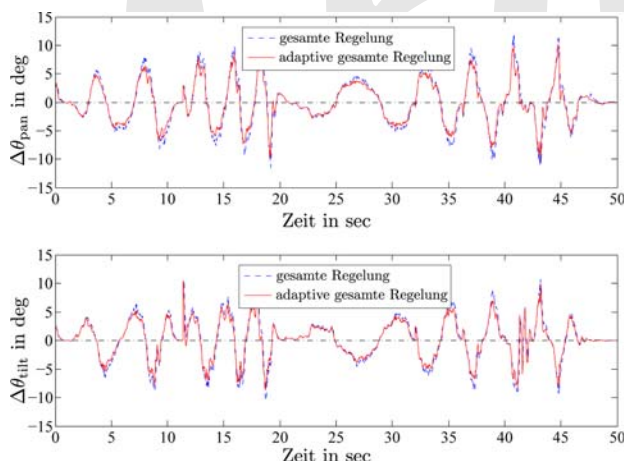


Bild 12 Ausrichtungsfehler mit und ohne adaptive Verstärkungen.

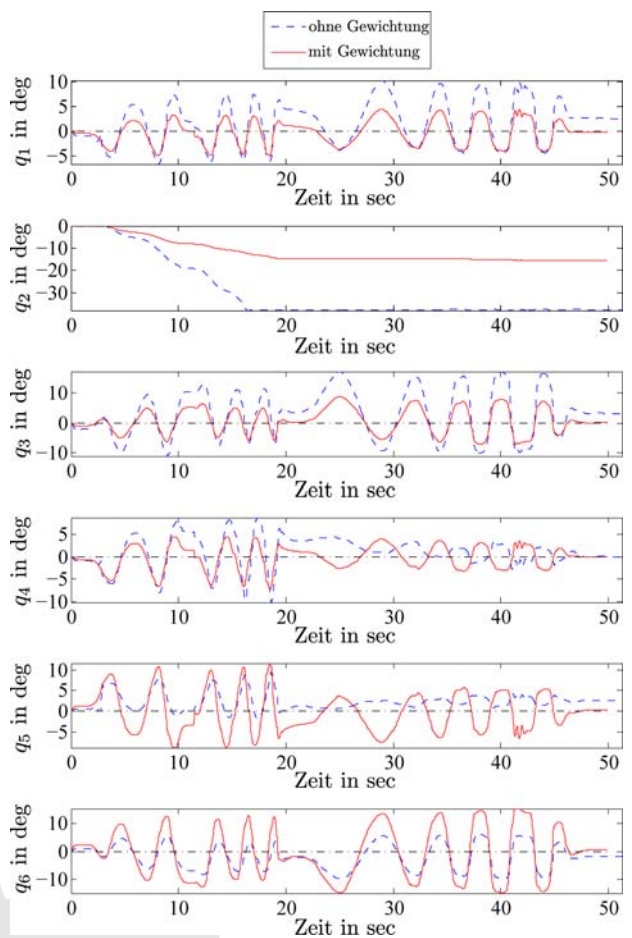


Bild 13 Gelenkpositionen mit und ohne Gewichtungsmatrix W in der Pseudoinversion.

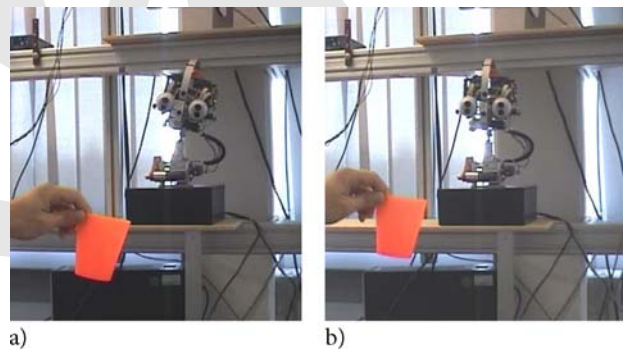


Bild 14 Einfluss der Eigenbewegung auf die Kopfkonfiguration. (a) Ohne Eigenbewegung; (b) Mit Eigenbewegung.

sofort nach dem Ende der Verfolgung des bewegten Zieles erreicht wurde. Bild 14b dagegen zeigt die Kopfkonfiguration nach der Eigenbewegung, die mit quasistatischem Ziel ausgeführt wurde. Es ist leicht zu erkennen, dass der Kopf in diesem zweiten Fall eine natürlichere Konfiguration annimmt.

5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Konzept für die Blickregelung eines redundanten humanoiden Roboterkopfes baut auf

einem Kalman-Filter auf, das die Messdaten einer Stereokamera verarbeitet, um aktuelle sowie zukünftige Positionen eines Zielobjekts zu schätzen. Eine Adaption der Prozesskovarianzmatrix erhöht die Robustheit dieser Schätzung gegenüber erheblichen dynamischen Variationen der Zieltrajektorie. Das Regelgesetz wird auf Gelenkgeschwindigkeitsebene realisiert und beinhaltet eine zum Ausrichtungsfehler proportionale Feedback-Komponente sowie einen Feedforward-Anteil basierend auf der prädierten Position des Zieles. Eine bessere dynamische Antwort unter variablen Randbedingungen wird mittels Adaption beider Reglerparameter erreicht. Die differentielle inverse Kinematik wird anhand einer geeigneten gewichteten Pseudoinverse der aufgabenspezifischen Jakobi-Matrix unter Berücksichtigung von Positions- und Geschwindigkeitsgrenzen sowie einer Priorisierung der Gelenke gelöst. Eigenbewegungen in einem quasistatischen Zustand sorgen für natürliche Endkonfigurationen des Kopfes. Die dargestellten experimentellen Ergebnisse zeigen deutlich die Güte des entwickelten Regelungskonzept, das eine robuste Verfolgung des Zielobjekts und gleichzeitig die Durchführung menschenähnlicher Bewegungen ermöglicht.

Danksagung

Diese Arbeit ist aus der Kooperation zwischen dem Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildverarbeitung (IOSB) und dem Dipartimento di Ingegneria Informatica, Automatica e Gestionale (DIAG) der Universität Rom „La Sapienza“ im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs (SFB) 588 „Humanoide Roboter“ entstanden. Die Autoren bedanken sich bei Herrn Luca Vallone für die Unterstützung beim Reglerentwurf.

Dieser Beitrag ist eine überarbeitete Version von: G. Milighetti, L. Vallone, A. De Luca, „Adaptive predictive gaze control of a redundant humanoid robot head“, 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 3192–3198. Veröffentlichung von IEEE genehmigt.

Literatur

- [1] Sonderforschungsbereich 588: „Humanoid Robots“ – Learning and cooperating multimodal robots, 2001.
- [2] Nakamura, Y.: Advanced Robotics: Redundancy and Optimization. Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1991.
- [3] Sakagami, S.; et al.: The intelligent ASIMO: System overview and integration. In: Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, S. 2478–2483, Lausanne, CH, 2002.
- [4] Akachi, K.; et al.: Development of humanoid robot HRP-3P. In: Proc. 5th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, S. 50–55, Tsukuba, JPN, 2005.
- [5] Fujitsu Laboratories: Humanoid Robot HOAP-3, 2008.
- [6] Miwa, H.; et al.: Development of a new human-like head robot WE-4. In: Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, S. 2443–2448, Lausanne, CH, 2002.
- [7] Aryananda, L.; Weber, J.: MERTZ: A quest for a robust and scalable active vision humanoid head robot. In: Proc. 4th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, S. 513–532, Los Angeles, CA, USA, 2004.
- [8] Kozima, H.; Yano, H.: A robot that learns to communicate with human caregivers. In: Int. Work. on Epigenetic Robotics, Lund, S, 2001.
- [9] Beira, R.; et al.: Design of the robot-cub (iCub) head. In: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, S. 94–100, Orlando, FL, USA, 2006.
- [10] Cheng, G.; et al.: CB: A humanoid research platform for exploring neuroscience. Advanced Robotics, 21(10), S. 1097–1114, 2007.
- [11] Shibata, T.; Schaal, S.: Biomimetic gaze stabilization based on feedback-error-learning with nonparametric regression networks. Neural Networks, 14(2), S. 201–216, 2001.
- [12] Manfredi, L.; et al.: Implementation of a neurophysiological model of saccadic eye movements on an anthropomorphic robotic head. In: Proc. 6th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, S. 438–443, Genova, I, 2006.
- [13] Du, F.; et al.: Gaze control for a two-eyed robot head. In: Proc. British Machine Vision Conf., Glasgow, UK, 1991.
- [14] Gu, L.; Su, J.: Gaze control on humanoid robot head. In: Proc. 6th World Congr. on Intelligent Control and Automation, Dalian, PRC, 2006.
- [15] Faber, F.; Bennewitz, M.; Behnke, S.: Controlling the gaze direction of a humanoid robot with redundant joints. In: Proc. 17th IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication, S. 413–418, Munich, D, 2008.
- [16] Omrcen, D.; Ude, A.: Redundant control of a humanoid robot head with foveated vision for object tracking. In: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, S. 4151–4156, Anchorage, AK, USA, 2010.
- [17] Asfour, T.; Welke, K.; Azad, P.; Ude, A.; Dillmann, R.: The Karlsruhe Humanoid Head. In: Proc. 8th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, S. 447–453, Daejeon, KR, 2008.
- [18] Point Grey Research, Inc.: DragonFly2, 2010.
- [19] MCA2, Modul Controller Architecture Version 2.
- [20] Burget, F.: Entwicklung eines bildgestützten Erkennungs- und Lokalisierungsalgorithmus zur Objektverfolgung mittels eines humanoiden Roboterkopfes. Bachelor-thesis, 2009.
- [21] Espiau, B.; Chaumette, F.; Rives, P.: A new approach to visual servoing in robotics. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 8(3), S. 313–326, 1992.
- [22] Hutchinson, S.; Hager, G.; Corke, P.: A tutorial on visual servo control. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 12(5), S. 651–670, 1996.
- [23] Chan, Y.; Hu, A.; Plant, J.: A Kalman Filter Based Tracking Scheme with Input Estimation. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 15(2), S. 237–244, 1979.
- [24] Gutman, P.-O.; Velger, M.: Tracking targets using adaptive Kalman filtering. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 26(5), S. 691–699, 1990.
- [25] Antsaklis, P.; Michel, A.: Linear Systems. McGraw-Hill, New York, 1997.
- [26] Kiruluta, A.; Eizenman, M.; Pasupathy, S.: Predictive head movement tracking using a Kalman filter. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 27(2), S. 326–331, 1997.
- [27] Mehrotra, K.; Mahapatra, P.: A jerk model for tracking highly maneuvering targets. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 33(4), S. 1094–1105, 1997.
- [28] Chan, T.; Dubey, R.: A Weighted Least-Norm Solution Based Scheme for Avoiding Joint Limits for Redundant Joint Manipulators. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 11(2), S. 286–292, 1995.
- [29] Vallone, L.: Adaptive Predictive Gaze Control of a Redundant Humanoid Robot Head. Diplomarbeit, Università di Roma „La Sapienza“, Rome, I, 2010.



Dr.-Ing. Giulio Milighetti war wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) in Karlsruhe. Er ist jetzt als Entwickler bei der Firma KUKA Laboratories GmbH beschäftigt. Forschungsschwerpunkte: Robotik, Regelungstechnik, Sensortechnik.

Adresse: KUKA Laboratories GmbH, Zugspitzstraße 140, D-86165 Augsburg,
E-Mail: giulio.milighetti@kuka.com



Prof.-Dr. Alessandro De Luca ist Professor für Robotik und Regelungstechnik an der Universität di Roma „La Sapienza“. Forschungsschwerpunkte: Nichtlineare Regelung von Robotersystemen, Physikalische Mensch-Roboter-Interaktion.

Adresse: Dipartimento di Ingegneria Informatica, Automatica e Gestionale, Via Ariosto 25, I-00185 Rom, Italien,
E-Mail: deluca@dis.uniroma1.it

