

HealthCare: Matrixregler zur einfachen und präzisen Steuerung nichtkonstanter, zyklischer Sollprofile

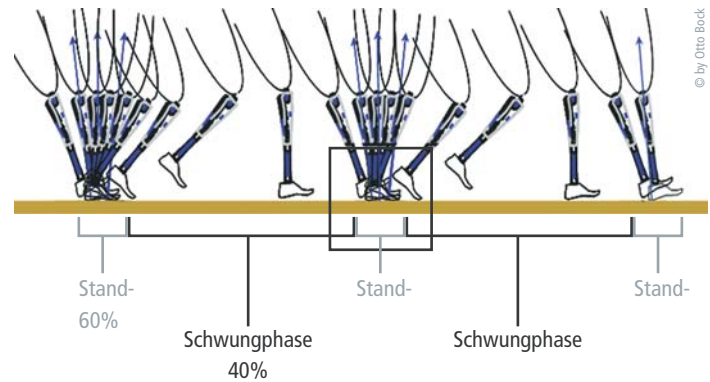
Komplexe Regelungstechnik einfach realisiert

Der universelle Regler-Algorithmus „Matrixregler“ der Otto Bock HealthCare GmbH wurde primär für eine Prüfmaschine zum Test von Prothesenfüßen entwickelt. Er eignet sich aber ebenso für pneumatische Servo-Positionierungen, wie sie z. B. in der Robotertechnologie, bei der Überwachung zyklisch nichtkonstanter Verfahrensabläufe, in CNC-Maschinen und bei der Regelung nichtkonstanter Abläufe in der Antriebstechnik vorkommen. Realisiert wurde der Matrixregler mit PC-basierter Steuerungstechnik von Beckhoff. Der Regler-Algorithmus wurde in IEC 61131 programmiert und direkt in TwinCAT PLC umgesetzt. Ziel der Entwicklung war eine software-basierte Lösung, die es ermöglicht eine standardisierte Hardware einzusetzen.



Prothesenträger mit dem weltweit ersten vollständig mikroprozessorgesteuerten Kniegelenk C-Leg von Otto Bock HealthCare

Grafik 1: Stand- und Schwungphase des menschlichen Gangs



© by Otto Bock

Das MedTech-Unternehmen Otto Bock HealthCare, mit Sitz in Duderstadt, in Deutschland, ist Hersteller von Produkten für Menschen mit körperlichen Handicaps und eingeschränkter körperlicher Mobilität. Das Produktspektrum reicht von Prothesen, über Rollstühle und Rehabilitationsmittel bis hin zu Orthesen. Das in dritter Generation inhabergeführte Unternehmen kann auf eine über 90-jährige Erfolgsgeschichte zurückblicken, deren Grundlagen die Innovationskraft und die frühe internationale Ausrichtung der Firma bilden. Die Otto-Bock-Gesellschaft greift auf einen Schutzrechtbestand von 670 erteilten und 524 angemeldeten Patenten zurück.

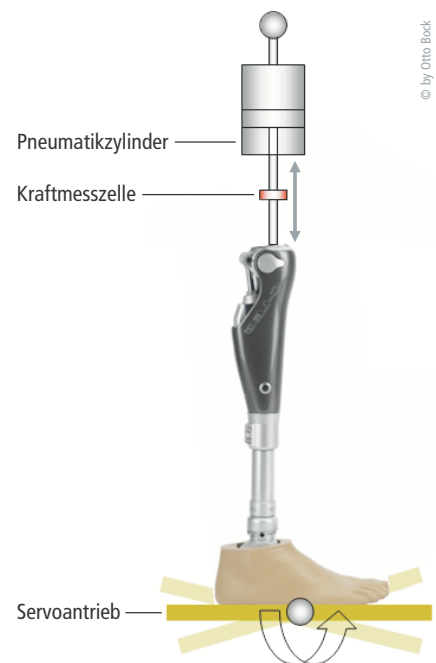
Prothesenfüße erfüllen nicht nur einen kosmetischen Zweck. Sie unterstützen je nach Patiententyp – von der altersbedingten Einschränkung bis zum hochaktiven Amputierten – ebenso den gesamten biomechanischen Prozess während des Gehens und Stehens. Um neu entwickelte Prothesenfüße standardisiert nach ISO-Norm zu prüfen, werden Prüfmaschinen benötigt, die die normierte Belastung und Winkelprofile wäh-

rend der Standphase (Grafik 1) 2 Millionen Mal gleichmäßig wiederholen. Das Ziel ist es, zeitgemäße, höchst funktionelle und lange zuverlässig funktionierende Prothesenbauteile für den Patienten in den Markt zu bringen.

Für eine solche Prüfmaschine wurde ein Standard-Pneumatikzylinder mit zwei proportionalen Ventilen, ein Beckhoff-Servoantrieb AX2010 mit EtherCAT-Schnittstelle, ein Beckhoff-Servomotor AM277S und Planetengetriebe mit einer Leistung von 4,5 kW, verschiedene Kraft- und Positionssensoren sowie die TwinCAT PLC auf einem Beckhoff Industrie-PC eingesetzt (Grafik 2). Der IPC steuert über EtherCAT bis zu 4 Prüfmodule gleichzeitig. Das Problem: Die Kombination von Prothesenfuß und Pneumatikzylinder führt zu einem komplexen Zusammenspiel, das sich während der simulierten Standphase dauernd verändert und durch den Typ der Fußkonstruktion sowie seine Größe und Abnutzung in der Prüfmaschine beeinflusst wird. Zu jedem Abrollwinkel reagiert der Prothesenfuß auf Belastungen unterschiedlich.



Prüfmaschine für Prothesenfüße

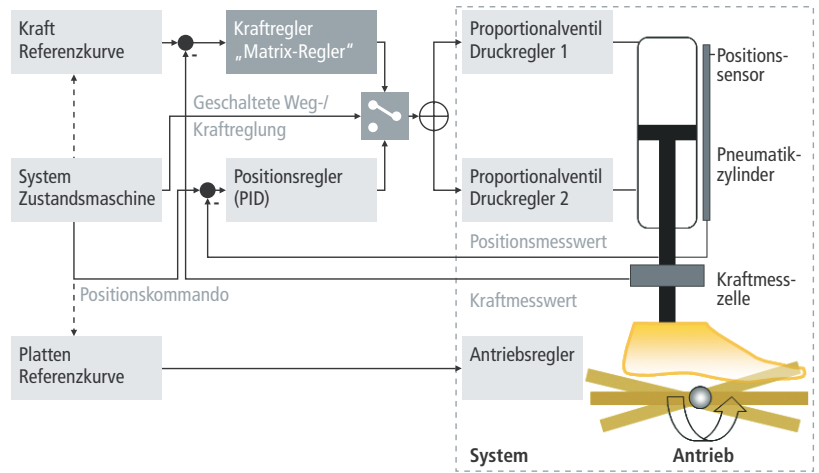


© by Otto Bock

Grafik 2: Simulation der Bodenreaktionskraft



Erik Albrecht-Laatsch ist bei Otto Bock HealthCare in der Produktentwicklung mit der Leitung verschiedener Projekte, u. a. dem Matrixregler, betraut. E-Mail: erik.laatsch@ottobock.de



Grafik 3: Schematische Darstellung des Systemaufbaus

Aufbau des Systems

Der ausgewählte Servoantrieb der Fußplatte kontrolliert auch bei hoher Belastung mit der erforderlichen Genauigkeit die Stellung des Fußes. Über zwei proportionale Druckventile wird die Pneumatik gesteuert – je nachdem, in welche Richtung sich der Kolben bewegt. So kann die Kraft in beide Richtungen (oben/unten) kontrolliert und über die eingesetzte Luft gesteuert werden.

Das System wird über die SPS mit einer Zykluszeit von 5 ms (200 Hz) kontrolliert. Ein Gehzyklus beträgt 1 s (1 Hz). Die Fußstellung ist von entscheidender Bedeutung für die Messung. Ein Positions-PID-Regler wird daher am Ende der Standphase eingesetzt, wenn der Kraftregler nicht aktiv ist. Die Zustandsmaschine entscheidet, wann der Positions- oder der Kraftregler aktiv wird (Grafik 3).

Analyse des Systems

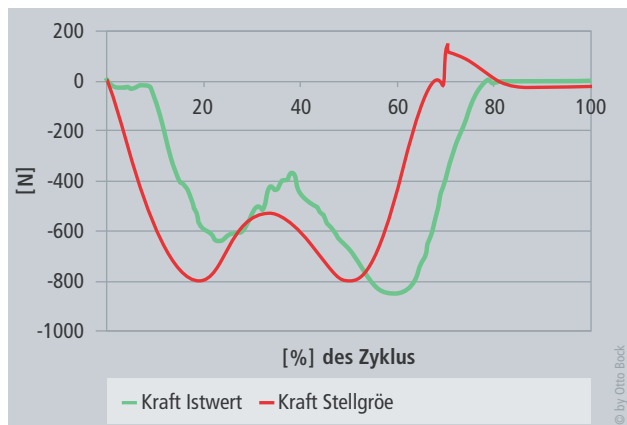
Um die Systemreaktionen zu untersuchen, wurde der Kraftverlauf über die Ventilregler ausgegeben. Dabei kamen der Positionsregler im geschlossenen und der Kraftregler im offenen Regelkreislauf zum Einsatz. In diesem Modus stimmten die gewünschten und tatsächlichen Kraftverlaufkurven jedoch nicht überein (Grafik 4).

Die deutlich sichtbare Phasenverschiebung resultierte aus der SPS-Zykluszeit, der Verzögerung durch den Feldbus, den Ventilregler-Totpunkten, dem Tiefpassverhalten des Pneumatikzylinders und der Systemantwortzeit des Fußes. Um diese Phasenverschiebung zu eliminieren, wurde das Ausgangssignal durch einen FIFO-Puffer auf 18°/Hz (18° bei 1 Hz Prüfzyklus) – abhängig von der Prüfgeschwindigkeit – verschoben. Die Amplitudendifferenz wurde so zwar minimiert, aber nicht völlig beseitigt (Grafik 5). Ein weiterer Kraftfehler musste kompensiert werden: Die Amplitude weicht bei jedem Fußwinkel – entsprechend der Systemcharakteristik des Prothesenfußes – unterschiedlich stark vom Sollwert ab.

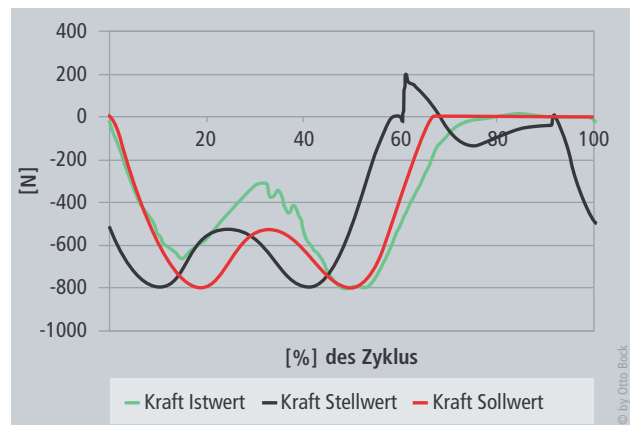
Der Matrixregler

Der Einsatz eines PID-Reglers mit unterschiedlicher Parametrisierung für jeden Punkt der Kurve führte nicht zu einem stabilen Signal. Da sich auch das Fußsystem bei jedem Plattenwinkel ändert, wurde für jeden Plattenwinkel ein einzelner PID-Regler eingesetzt.

Mit einer Zyklusfrequenz von 1 Hz und einer SPS-Zykluszeit von 5 ms wird mit 120 PID-Reglern die Standphase erzeugt. Die restliche Zykluszeit wird zur Re-Positionierung des Prothesenfußes benötigt.



Grafik 4: Systemreaktion im offenen Regelkreislaufbetrieb



Grafik 5: Minimierung der Phasenverschiebung

Vorteile des Matrixreglers

- Der Matrixregler kann auf einfache Weise Systeme regeln, die zu unterschiedlichen Zeiten innerhalb eines Regelungszyklus unterschiedliche Sprungantworten geben.
- Die Parametrisierung der Standardregler erfordert keine spezifischen Regler oder Systemmodelle. Auf diese Weise ist eine schnelle und kostengünstige kundenspezifische Anpassung der Regelzyklen (z. B. für spezielle Prüfzyklen in Prüfmaschinen, bei Füllvorgängen sowie bei hydraulischen oder pneumatischen Steuervorgängen) möglich.

- Adaptivregler, adaptive PID-Regler, Fuzzy-Regler, komplizierte Systemmodelle oder teure Controller werden nicht mehr benötigt, da die Abtastrate sehr niedrig bleiben kann.
- Das Matrix-Reglersystem arbeitet bereits bei extrem langen Zyklen (5 ms, Abtastrate 200 Hz) und benötigt nur wenig Rechenleistung.
- Die kurvengenaue Nachführung des Systems erfolgt innerhalb eines sehr engen Sollwertkorridors. Bei der Anwendung des Matrixreglers in Prüfmaschinen für Fußprothesen wurde die Präzision der Pneumatik-Aktuatoren um den Faktor fünf erhöht.

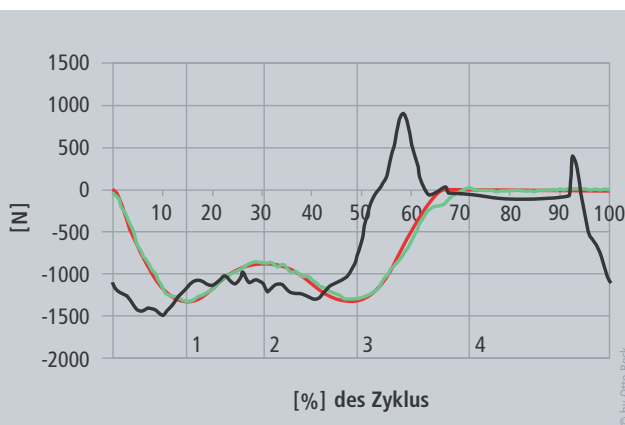
Jeder PID-Regler arbeitet in seinem Bereich der Gesamtkurve. Die Informationen der letzten Testreihe werden genutzt, um die Kraftfehler in jedem Punkt zu korrigieren. Der Standard-PID-Algorithmus besteht aus Funktionen für den proportionalen (K_v), integralen (T_n) und differentialen (T_v) Bereich. Diese können von Regler zu Regler voneinander abweichen. Gemeinsam erzeugen sie die PID-Parametermatrix:

$$M = \begin{pmatrix} K_{R0} & K_{R1} & \dots & K_{Rn} \\ T_{N0} & T_{N1} & \dots & T_{Nn} \\ T_{v0} & T_{v1} & \dots & T_{vn} \end{pmatrix}$$

Durch die Veränderung der Parameter jedes einzelnen Reglers lässt sich der Regler-Output für jeden Bereich der Kurve einzeln justieren.

Präzision um den Faktor fünf erhöht

Diese einfache Art und Weise das Kraftprofil zu steuern, führte zu einer sofortigen Verbesserung. Grafik 6 zeigt das Systemverhalten nach nur 200 Testzyklen. Die Abweichung bei 2 Millionen Lastzyklen beträgt lediglich ca. 3%. Während die Regler-Matrix zyklisch arbeitet, kann das Ausgangssignal um 18° verschoben werden, um den Totpunkt und systembedingte Verzögerungen zu kompensieren.“



Grafik 6: Referenzkurve (rot), Feedbackkurve (grün) und Regler-Outputkurve (schwarz)

Solange sich das Feedbacksignal in einer definierten Kurventoleranz befindet, greift der Matrixregler nicht ein. Verändert sich der Kraftverlauf innerhalb der zwei Millionen Lastzyklen, weil der Prothesenfuß verschleißt, so reguliert der Matrixregler bis zu einer definierten Anzahl von Korrektoreinstellungen nach. Wird diese überschritten, hat der Prothesenfuß den Test nicht bestanden. Die gemessenen Daten erleichtern die Analyse möglicher Konstruktions- oder Fertigungsschwächen.

Der Matrixregler ist einfach zu implementieren und beherrscht Systeme mit komplexen Steuerungsanforderungen. Dazu benötigt er lediglich die Rechenkapazität eines einzigen PID-Reglers für den SPS-Zyklus. „Eine Zykluszeit von 5 ms (200 Hz)“, erläutert Erik Albrecht-Laatsch, „erwies sich als ausreichend, um die Pneumatiksteuerung zu regeln. Es waren keine Simulationen oder andere komplexe Technologien notwendig, um das System zu kontrollieren.“

Patentierter Matrixregler vielseitig einsetzbar

Die Regelung zyklischer Vorgänge mit nichtkonstanten Abläufen stellt an die Regelungstechnik hohe Anforderungen. Der vorgestellte Matrixregler bietet hier eine überraschend einfache Lösung: Die nichtkonstanten Regelungsprofile werden in viele konstante Regelungsabschnitte unterteilt. So entsteht eine Zeit-Regel-Matrix, in der jede Spalte der Matrix zweierlei repräsentiert: prozessbezogen den kurzen Zeitabschnitt eines nichtkonstanten Sollprofils; abschnittbezogen ein autonomes, konstantes Sollprofil. Innerhalb dieses Abschnittes kann mit herkömmlichen PID-Reglern geregelt werden.

Dieser innovative Ansatz stellt ein neues regeltechnisches Modell für alle Arten von nichtkonstanten und konstanten periodischen Signalprofilen dar. Die Nutzung des patentierten Matrixreglers (EP 1982240B1) ist als Lizenznehmer auch in vielen anderen Bereichen, wie Prüfmaschinen, Robotern, CNC-Maschinen sowie bei der Positionierungs- und Kraftregelung für andere Pneumatik- und Hydraulikapplikationen effektiv, sicher und preisgünstig.