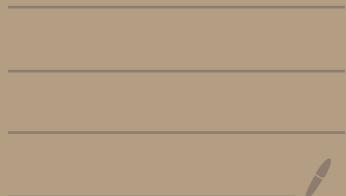


BioBots

SS 20



Bionik = Umsetzung biologischer Problemlösungen in die Technik
→ systematisches Lernen von der Natur

z.B. Lotuseffekt, Kleverschluss

Robotergenerationen

1. Generation progr. bare Manipulatoren 1960 - 1975

- geringe Rechenleistung
- nur feste Haltepunkte
- kaum sensorielle Fähigkeiten

2. Generation adaptive Roboter 1976 - 1982

- mehr Sensoren
- Anpassung an Umwelt
- eigene Progr. sprachen
- geringe Robo-Intelligenz

3. Generation autonome Roboter ab 1983

- hohe Rechenleistung
- Forderung nach Autonomie

4. Generation humanoide AI-Roboter

- Flexibilität bezgl. Umwelt, Aufgabe
- Lernfähigkeit + Selbstreflexion
- Emotion

biologisch motivierte Robotersysteme

= Bionik in der Robotik



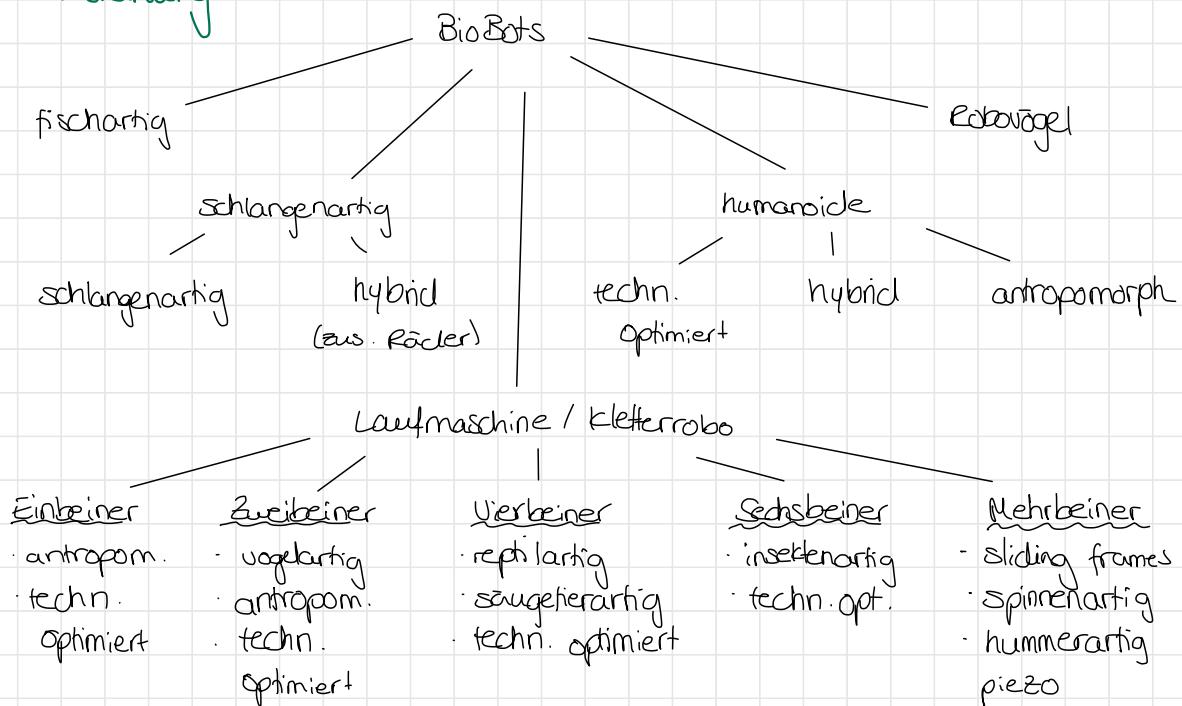
- leicht, robust, anpassungs-, lernfähig, energetisch optimiert, fehlertolerant, flexibel, flüssige Bewegungen (→ Hw-schonend)
- Integration in menschl. Umfeld
- Keine Robo-Infrastruktur notwendig

- Definition primär über Locomotionsformen
 - schwimmen, kriechen, laufen, hüpfen, Fliegen
- ~ Realisieren durch Übertragung von Prinzipien aus der Natur
 - Antrieb, Konstruktion, Umwelterfassung, Steuerung
- ~ Keine direkte Abbildung: konzentrieren auf Funktion + Mechanismus statt direkt zu kopieren

Systemanforderungen

- Autonomie + Mobilität
- Energie autarkie
- hohe Flexibilität
- Robust gg. versch. Störungen
- umfangreiche perzeptive Komponenten → erfassen interne Zust. + Umwelt
- adaptive Verhaltenssteuerung
- Erweiterbarkeit

Einordnung



Anwendungsfelder

- Wartung + Inspektion
- Erkundung raues Gelände
- Untersuchung von Krebsböden
- Forst-, Landwirtschaft
- Katastrophenschutz
- Prothetik
- Retta
- Assistenz
- Entertainment

Biomechanik

Leichtbau

Grundprinzipien natürlicher Konstruktion

1. hohe Funktionsintegration statt Funktionstrennung
2. ganzheitl. Optimierung (gcs. Tier)
3. Multifunktionalität statt Monofunktionalität
4. min. Energieeinsatz
5. Nutzung von Fremdenergie
6. zeitl. Limitierung statt Langlebigkeit (zB Schlangenhaut)
7. hohe Vernetzung / Wechselwirkung
8. Veränderungen in kleinen Schritten (zB Knochenwachstum)
9. Feinabstimmung ggübers der Umwelt
10. totales Recycling

biolog. Materialien: typische Merkmale

1. Materialschichtung während des Entstehens
2. streng funktionell (-> alles funktionell motiviert, keine glänzende Oberfläche nur weil schön)
3. funktionelle Kompartimente
4. häufig ultraleicht
5. Sandwich - Bauweise
6. Selbstreparabel
7. terminierte Lebensdauer

Materialauswahl!

Ziel: Gewichtsoptimierung mit Erhalten von Stabilität + Belastbarkeit

Zugdriecke

zB bei Bäumen, Knochen

-> Belastung fördert Aufbau
Entlastung fördert Abbau von Materialien

Konstruktionsprinzipien

Innenskelett

- hohe Stabilität, geringes Gewicht
↳ Netzwerk aus Knochenlamellen
- hohlbauweise
- extrem stabil (> 6000 N Längsbelastung)

Nachbau

- Rohre: · Verbundstoff aus Kohlenstofffaser, Gewebe, Epoxy
 - ⊕ · leicht maschinell fertigbar
 - hohe Biege-, Torsionsfestigkeit
 - sehr leicht
- ⊖ · schlecht nachbearbeitbar

3D-Druck

- leichtes Grundmaterial (PLA / ABS)
- hohlbauweise
- optimierte Geometrie
- mittlere Stabilität bei geringem Gewicht

Exoskelett

= Stützstruktur für Organismen mit stabiler äußerer Hülle

Chitin

- Stickstoffhaltiges Polysaccharid
- primärer Baustoff der Insekten
- untersch. Härtegrade durch untersch. Einlagerungen
- Schichtbauweise → versch. mech. Eigenschaften

Nachbau

- Glasfaser Verbundstoffe: · aus Gewebematten
 - viele Formen möglich
 - Dichte veränderbar
 - an kritischen Stellen erhöhen
 - unkrit. senken
 - relativ leicht

Werkstoffe

kennzahlen

- Dichte $\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}$
- Zugfestigkeit $R = \frac{F_{\text{Max}}}{A} = \frac{\text{max. Kraft}}{\text{Fläche}}$
- mechanische Spannung $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$
- Dehnung = relative Längenänderung $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\text{Längenänderung}}{\text{urspr. Länge}}$
- Elastizitätsmodul $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Dehnung}} = \text{const.}$
- Bruchfestigkeit = mech. Spannung die unter gleichmäßiger Steigerung der Belastung zum Bruch führt

zB GFK, CFK: leicht (geringe Dichte)
ABER geringes R, E, Bruchfestigkeit

Stahl: schwer
ABER hohes R, E, Bruchfestigkeit

=> versch. Anwendungen benötigen versch. Werkstoffe

~ häufig: Materialmix

Roboterbau Leichtbau robos

- versch. Materialien
- Stahl / Alu selten
 - für hochbelastete Antriebsteile
 - Komplexe Belastungen
- Fusverbund bei geringen Belastungen
- Kunststoffe für Schutz / Abdeckungen
- 3D Druck: ziel spezialisierte Werkstoffe, Bauteile
- neue Strukturen (Waben / Lamellen / ...)

⊕ neue Chancen

↳ leichte Robos + limit. Speed

⇒ sichere MRI

Verhältnis Kraft- Gewicht

t = Traglast, g = Gewicht

Kukka KR 1000 Titan : $t = 1000 \text{ kg}$ $g \approx 5t$ $\zeta_{0,2}$

Strongman : $t = 517 \text{ kg}$ (kurzfristig!) $g \approx 200 \text{ kg}$ $\zeta_{2,6}$

Ameise : $t = 350 \text{ mg}$ $g \approx t \text{ mg}$ $\zeta_{40!}$

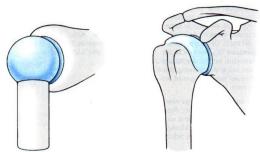
Morphologie

= kinematische Struktur

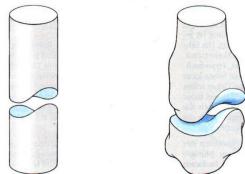
Gelenke

Natur

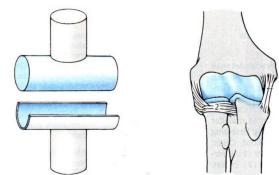
- Kugelgelenk



- Sattelgelenk



- Scharniergelenk



· selbstschmierend

· gekapselt : Kapsel, Muskelgewebe, Haut, Chitopanzer

· optimiert Geometrie für Anwendung (z.B. Knie)

Mechanik

- Momentengelenk



· aktiver Antrieb nur für Rotations-, Translationsgelenke

- Querkraftgelenk



- Normalgelenk



Kugelgelenk

- sehr schwer nachzubilden
↳ approx. durch 3 Rotationsgelenke

Kapselung

- klassisch: Silikon- / Wellendichtringe
(-) zu schwer
Gummi nur begrenzt haltbar

Multisegmentsysteme

zB schlängenartige Systeme

Wirbelsäule

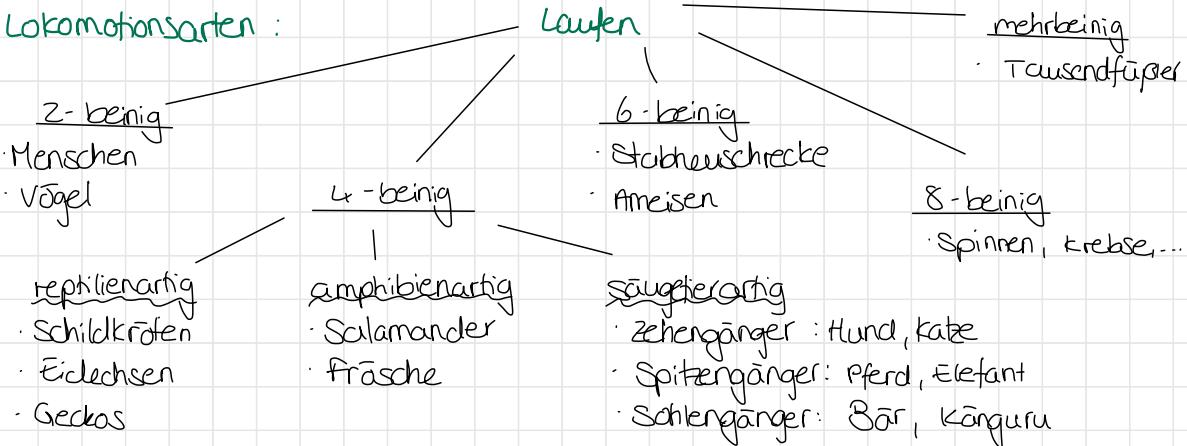
- = biolog. Multisegment-System
- flexibles System aus vielen gekoppelten Einzelelementen

Laufmaschinen

Beispiel: Stabheuschrecke

- interessant für Robotik da...
- ... 6 - Beiner
- ... langsames Insekt
- ... einfacher kinematischer Aufbau, trotzdem sehr flexibel
- ... geringe Intelligenz / wenige Neuronen → ausgiebig untersucht

Lokomotionsarten :





(a) insektenartig



(b) reptilien-/amphibienartig

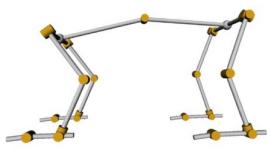


(c) säugetierartig

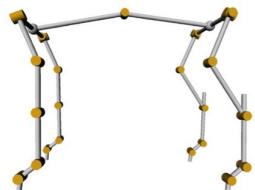
Säugetiere



(a) Zehengänger



(b) Sohlengänger

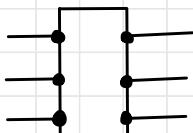


(c) Spitzengänger

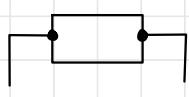
Anstellwinkel

|Yaw Angle| & |Roll Angle| $> 0^\circ$ in der Natur

$\underline{0^\circ}$

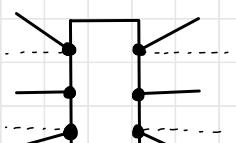


Yaw

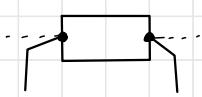


Roll

$\underline{\geq 0^\circ}$



Yaw



Roll

Energieeffizienz

Strömungswiderstand

Ziel: reduzieren

$$\text{Maßzahl } c_w = \frac{\text{Druck}}{\text{Reibung}}$$

abh. von Flüssigkeitsdichte, Referenzfläche, Widerstandskraft

z.B. Pinguin: 0.03

raue Oberflächen

· nicht zwingend schlechter!

→ Haifischhaut, Schmetterlingschuppen bilden Streichlinien

→ Luftverwirbelungen

⇒ strömungsgünstiger

Laufen

specific resistance

· Effizienz der Lokomotion

$$E = \frac{P_{\text{lok}}(t)}{G \cdot v(t)}$$

· $P_{\text{lok}}(t)$ = Leistung für Fortbewegung

· $v(t)$ = Laufgeschw.

· G = Gewichtskraft

· Dimensionslos, unabh. von Art des Fahrzeugs / Robos

metabolic cost of transport

· Vergleich zur Natur möglich

Annahme: rel. Verbrauch skaliert mit Masse

$$\frac{\text{Verbrauch}}{\text{Masse} \times \text{Geschw.}}$$

↪ Skalierungsfaktor Masse $-0,38$

=> relativer Verbrauch nimmt mit Masse ab

MUSKELN

biologischer Muskel

- nur ein Teil des Bewegungsapparats
Sehnen, Muskelfaszie, Sehnscheiden, Gleitbeutel, Sesambeine, Sehnenknorpel
- 212 Gelenke, davon 140 "echt" - knöchern
72 "unecht" - Verbindungen durch Knorpel / Bindegewebe
- Muskeln können nur ziehen
→ antagonistisches Prinzip
- 800 Muskeln, je für spezielle Bereiche

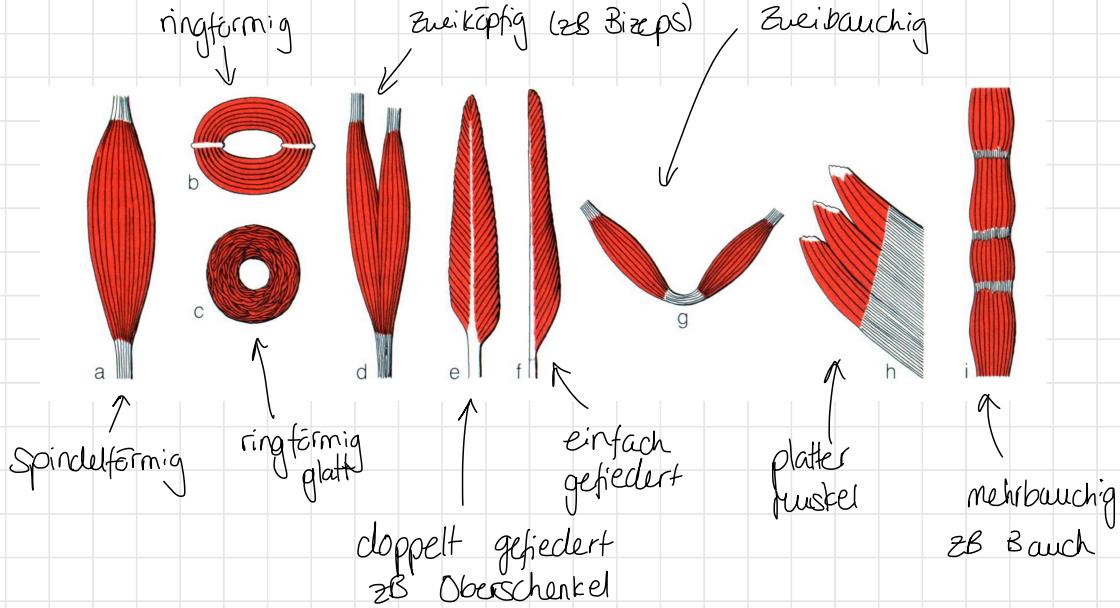
Muskelgewebe

quergestreift = willkürmuskulatur zB Bizeps, Trizeps

! Herzmuskel auch quergestreift, aber keine Willkürmotorik
→ keine motor. Endplatten

glatt = keine Willkürmotorik zB in Darm

Muskel formen



Schultergelenk

Problem: Kugelgelenk → komplexste Form
→ benötigt viele kooperierende Muskelpaare

Pferd: Schultern nur von Muskeln gehalten
↳ Vorwärtsbelastung beim Laufen wird schwingend abgefangen

Muskelaufbau

Muskelfaserbündel > Muskelfaser > Muskelfibille > Sarkomer
> Aktin-/Myosin-Filamente

- Muskelfasern fast parallel in Längsrichtung
- Volumen bei Kontraktion konstant → Dicker durch Vergrößerung des Faserwinkels

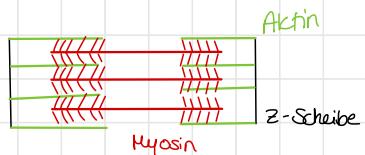
Kontraktion

- Myosin, Aktin verändern Länge NICHT
→ schieben sich ineinander

Erschlafft:



Kontrahiert:



- je größer der Fiedenungswinkel der Myosinköpfchen desto geringer die erreichte Kraft
- Kompensation: größerer Fiedenungswinkel \Rightarrow mehr Muskelfasern beteiligt

Faustregel:

je größer der Querschnitt, desto größer die Kraft

Hillsche Beziehung

Zusammenhang

Muskelkraft - Verkürzungsgeschw.



• geringe Last \rightarrow max. Verk. geschw.

• ab gewisser Last: Muskel nicht verkürzbar = isometrische Verhältnisse

Muskeln + Nerven

- Muskeln von ≥ 1 Nerven versorgt
 - ↳ enthält motorische + sensible Fasern
- Muskel besitzt Rezeptoren → informieren über Muskelzustand
 - Dehnungsrezeptor (Muskelzindeln)
 - Spannungsrezeptor (Sehnenorgane)
- Tonus = Muskelgrundspannung → auch in Ruhe laufen Nervenimpulse in Muskel
- verstärkte Nervenimpulse:
 - Verkürzung = isotonische Kontraktion, keine Kraftänderung
 - Spannungszunahme = isometrische Kontraktion, keine Längenänderung
- Bewegung durch **synergetisches** oder **antagonistisches** Zusammenspiel
 - ↙ gleiche Wirkrichtung
 - ↘ gegensätzliche Wirkrichtung

⇒ Kombination beider ermöglicht genau dosierte bremsende, gezielte, harmonische, Bewegung
- ein-achsige Gelenke : relativ leicht
komplexe : kompliziertes Zusammenspiel

Antriebe

Pneumatisch = mit Druckluft

⊕ schnell

- leicht federnd durch Kompressierbarkeit der Luft
- kein Schmiermittel nötig → sauber



⊖ schlechte Positioniergenauigkeit

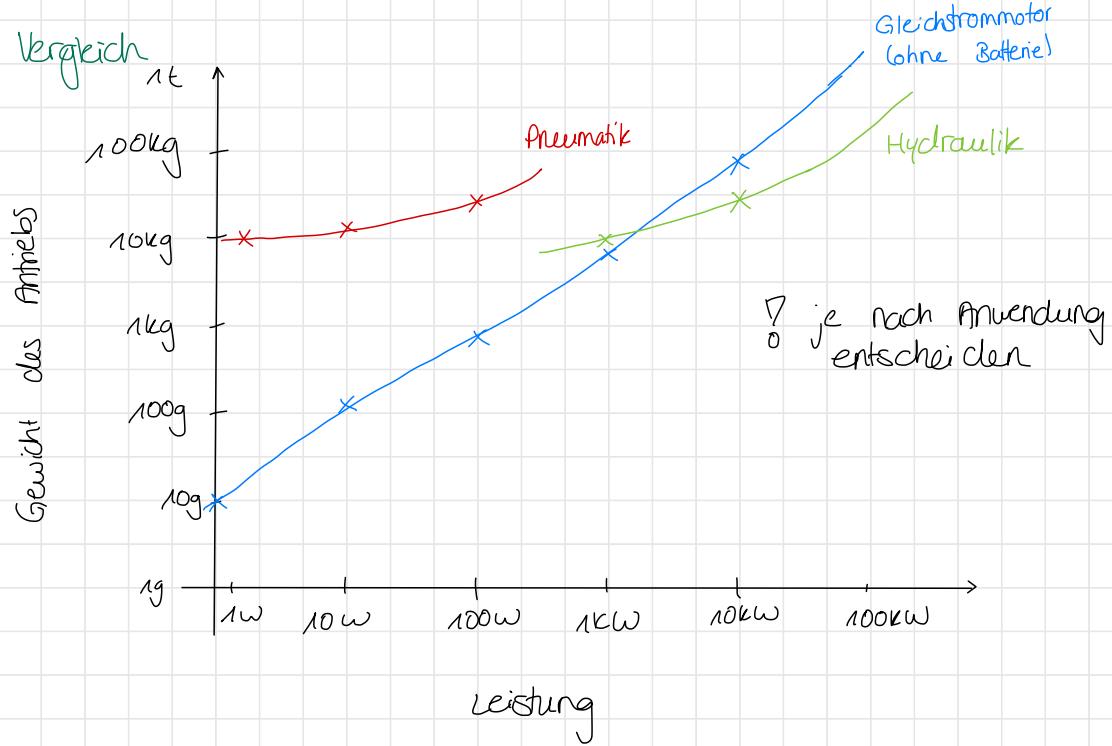
Hydraulisch = mit Flüssigkeiten

- ⊕ hohe Kraft
- ⊖ langsam
- laut
- Verunreinigungen durch Schmiermittel
- schlechte Pos.- und Wdh.-Genauigkeit

Elektrisch

- ⊕ klein, kompakt
- leise
- gute Regelbarkeit
- hohe Pos.- und Wdh.-Genauigkeit
- ⊖ wenig Kraft
- langsam

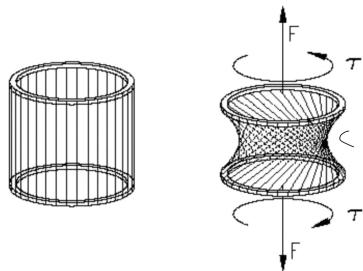
Vergleich



Künstliche Muskeln

Mechanischer Muskel

LADD = Linear to Angle Displacement Device



verdrehen 2 Teile gegeneinander
→ Spannung im zwischen "netz"

CLADD = Concentric LADD

- inneres + äußeres LADD gegeneinander verdrehen

Polymermuskeln chemisch

LAP = Light-Activated Polymers → Veränderung durch Lichtimpulse

SMP = Shape Memory Polymers → Form abh. von Temperatur

EAP = electro-activated Polymers → Verformung im elektrischen Feld

Piezoelektrische Antriebe

- basieren auf piezoeel. Effekt:
 - durch Verformung entsteht Spannung
 - durch Spannung entsteht Verformung (inverser P.eff.)
- (+) · hochpräzise → nm Genauigkeit!

Flüssigkeitsmuskel

Spinnenprinzip

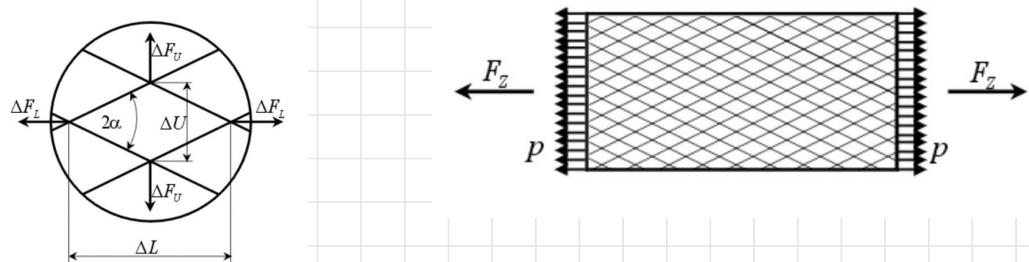
- Gelenke haben Flüssigkeitssack, der gefüllt oder entleert wird
↳ dadurch entsteht Bewegung



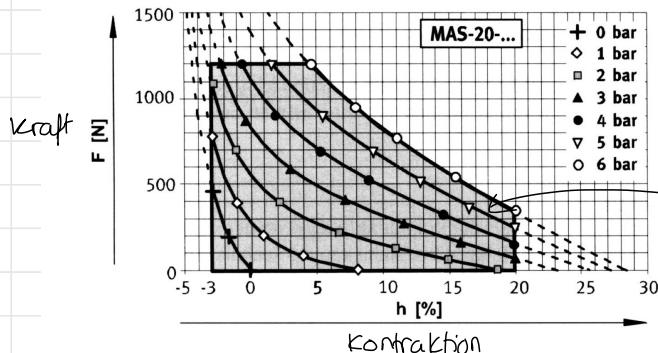
McKibben - Prinzip

Muskel = Kunststoffschlauch mit Gewebematte

- Gewebe mattefasern nicht veränderlich in Länge falls Grundfaserwinkel $< 55^\circ$



- Innendruck im Muskel → Längskontraktion = Zugkraft in axiale Richtung



Zulässiger Einsatzbereich

- statisches Muskelmodell basiert auf Annahme eines idealen Zylinders
 ~> erweitert durch zusätzl. Params, da Muskelenden abgeschnürt

- dynamisches Muskelmodell durch

Muskel = Feder (ρ, k) + Dämpfer (ρ, \dot{k})
 beschrieben

=> Analyse zeigt: Muskel zeigt Hooke'sche Beziehung
 => ähnelt biolog. Muskel :-)

Anwendung

- Laufrobotos
- humanoide Robos
- Roboarme
- Flugrobotos
- Unterwasser-Robos
- (• Weltraum-Robos -> noch selten, da Abluft nicht "recyclet" wird)

Beispiel: Shadow Hand

-> 20 Muskeln
 24 Gelenke

Evaluation

⊕ sehr natürlich

⊖ Ansteuerung sehr komplex

Kombination vieler Muskeln sehr schwierig

sehr laut

sehr empfindlich

=> bisher eher prototypisch

- braucht Kompressor, aber zu schwer um auf Robo zu platzieren

Vergleich

biolog. Muskel

fluidisch

Kontraktion

50-70%

35%

↓

Kraft / cm²

20-60 N

bis 700 N

↑↑

Leistung / kg

40-250 W/kg

0,5-2 kW/kg

↑↑

Wirkungsgrad

20-30%

22-50%

↑

Kontraktionsgeschw.

bis 8 m/s

bis 2 m/s

↓

Regeneration

ja

nein

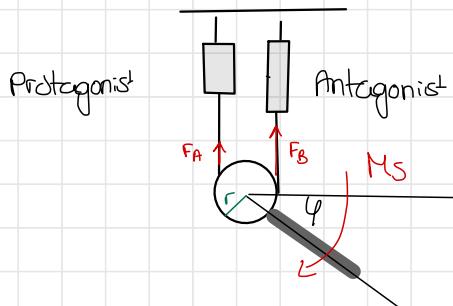
↔

Antagonistische Regelung

Gelenkregelung Stabheuschrecke

Flexor + Extensor als Antagonisten
→ bewegen Tibia (Beinsegment)

Kräfte im Gelenk



$$(F_A - F_B) \cdot r = M_S$$

$=$ Gelenkmoment

$$F_A, F_B = \text{Gelenkkraft im Muskel A, B}$$

$r = \text{Radius Gelenktrommel}$

- präzise Bewegung mit künstl. Muskeln hochkomplex
 - nicht-lineare Zusammenhänge
 - antagon. Prinzip
 - Pneumatik

Muskel als Antrieb

für Lautrabis

Vorteile von Muskeln

- schnelle, präzise, langsame Bewegungen möglich
- mit Sehnen zusammen als Aktuator und Sensor
- passive Dämpfung als Energiespeicher
- passive Nachgiebigkeit → gute Anpassung an unebenes Gelände

Problem

nur Zugkräfte → deshalb antagonistische Paare
→ komplizierter

SENSOREN

Sinn, Rezeptortyp	Stimulation	Sinnesorgan
Mechanische Sinne		
Berührung	Druck, Zug	Taktile Zellen
Fluss	Fluss in Flüssigk. / Gasen	z.B. Seitenlinienorgane bei Fischen
Rotation	Winkelbeschl.	Bogengänge
Orientierung	lineare Beschl.	Bogengänge / Schnürrhaarzellen (Ameise)
Hören	Schallwellen (= Druckwellen)	Cochlea
chemische Sinne		
Geruch	chem. Substanzen in Gasen	Riehschleimhaut (Nase)
Geschmack	gelöste Substanzen	Geschmacksknospen (Zunge)
elektr. Sinn	elektr. Felder	z.B. in maroden Fischen
magn. Sinn	Magnet. Felder	z.B. Zugvögel, Bienen
Sehsinn	elektromagn. Wellen	Augen (Linsenauge, Facettenauge,...)

Signalverarbeitung Mensch

- Umwelt \rightarrow Mensch mit 11 MBit/s
- interne Verarbeitungsgeschw. im Bewusstsein 50 bit/s
- Mensch \rightarrow Umwelt mit 10 MBit/s

Neuronen

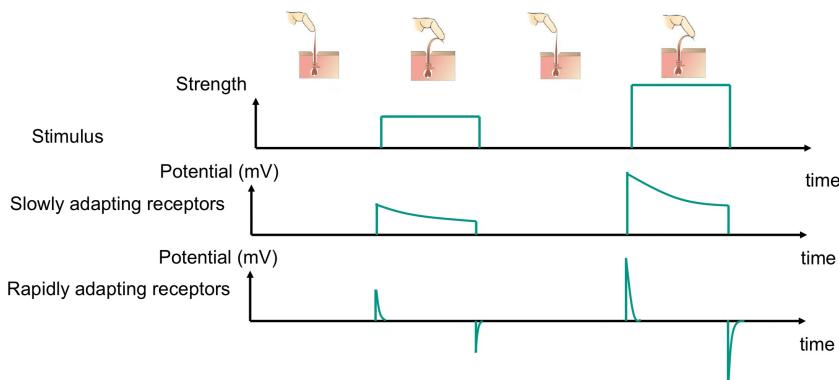
3 Arten:

- Afferente Neuronen : Input
- Efferente Neuronen : Output
- Interneuronen : Umwandlung aff. \leftrightarrow eff.
 \cong g.g. aller Neuronen

Signalcodierung

Rezeptor : Transduktion

= Konversion Stimulus \rightarrow elektr. Signal



Perzeption

Umwelt \rightarrow Sensoren \rightarrow konvertiert \rightarrow Interpretation \rightarrow Verhaltensänderung

Perzeption

Sinne des Menschen

Tastsinne

- Temperatur
 - Druck
 - Propriozeption
 - Glieder positionen
- } Selbst-wahrnehmung

spezielle Sinne

- Sehen
- Hören
- Balance
- Geschmack
- Geruch

Sensoren

- abgeleitet von menschl. Sinnen

Sehen → Kamera

Geruch → Gas-Sensor

Benähnung → Druck-Sensor

Geschmack → chem. Sensor

Sensor = Gerät das bei Auslösen durch physikalisches Phänomen elekt. Signal erzeugt, das phys. Phän. beschreibt

Sensoren in Robotik

Interne Sensoren

- Infos über inneren Zustand zB Gelenkwinkelmesser
 - Positionssensoren (Potentiometer, optische Encoder, ...)
 - Geschw.keitssensoren (Tacho, optische Encoder)
 - Beschl. sensoren (Si-Sensoren, Piezo-Sensoren)
 - Navigationssensoren (Gyroskop, Magnetfeldsensor)

Externe Sensoren

- Infos über Umwelt zB Kamera
- Berührungssensoren (Touch, Force - Torque)
- Proximitysensoren (Induktiv, kapazitiv, optisch, akustisch)
- Beschleunigungssensoren (optisch, Radar, akustisch)
- Visuelle Sensoren (CCD/CMOS, OVS, Time of flight, LiDAR)
- Positionsensoren (differenzielles) GPS, Landmarken)
↳ globale Pos

Anforderungen

- Genauigkeit
- Präzision, Wiederholgenauigkeit
- Betriebsbereich
- Antwortgeschwindigkeit
- Kalibrierung
- Kosten
- Verlässlichkeit
- Linearität
- Auflösung
- Reproduzierbarkeit
- Interferenz
- Alterung
- Antwortverhalten
- einfache Installation

→ wähle Sensoren abh. von Aufgabe

Bionische Sensoren

Sensoren in der Natur:

- hoch spezialisiert für Anwendung
- hoch miniaturisiert

Berührung

Homunculus = repr. der menschl. Somatosensorik

⇒ Dominanz bei Händen, Lippen, Zunge

Sinneszellen

- höhere Dichte in Fingerspitzen
- **Merkel**: Berührung, Druck
- **Meissner**: Berührung, Druck → höhere Dichte
- **Ruffini Endbüschel**: Deformation
- **Pacini Körperchen**: Vibration

Codierung

- versch. Reize haben untersch. Codierung = versch. spikes
→ werden versch. ans Gehirn geleitet

Taktile Sensoren

- = Materialien deren phys. Messgröße sich bei Deformation ändert
 - Widerstand
 - Leitfähigkeit
 - Kapazität
 - Induktion
 - optische Größen (Reflexion, Transduktion, Polarisierung)

Strain Gauge = Dehnungsmessstreifen

- Widerstandsänderung durch Deformation
- Widerstand kalibriert respektive Kräften ⇒ Kraftsensor

- ⊕ · sehr klein
· sehr feine Auflösung ⇒ geringste Unterschiede wahrnehmbar

- ⊖ · Auswertung teuer
· Fehleranfälligkeit

optischer Kraftsensor

- Markerpunktewolke in Fingerspitze → von Kamera erfasst
- bei Druck: Punkte verschieben sich ~ Muster ändert sich

Künstliche Schnurhaare

Vorbild: Mäuse → Schnurhaare spüren Umgebung

- dünnes Haar auf Mikrofon
→ Auslenkung vom Haar erzeugt Signal im Mikro

Touchscreen

viele mögliche Umsetzungen:

- Widerstand
 - 2 transparente, leitfähige Schichten
↳ 1 mit Spannung
bei Druck: 2 Layer berühren sich
- Kapazität
 - Isolator beschichtet mit durchsichtigem Leiter
 - Druck: elektrostatisches Feld gestört
~ Kapazitätsänderung
 - haupts. in Smartphones
- Induktion, Schallwellen, infrarot, optisch, hybrid, ...

Temperatursinn

Mensch: 2 versch. Thermorezeptoren

- warm: max. bei $\approx 45^\circ\text{C}$ danach Änderung nicht mehr wahrnehmbar
 - kalt: max. bei $\approx 25^\circ\text{C}$
-
- Capsaicin löst Ionenkanäle der Wärmerezeptoren aus
 - Menthol

- Feuerkafer:
- kann Feuer auf > 100km detektieren
 - Rezeptoren:
 - kleine Scheibe stellt Druckänderung durch Hitze fest
 - Infrarot - Rezeptoren
 - Riechen von Feuer-spezifischen Bestandteilen
 - Sehen der Rauchwolke

Thermosensoren

Widerstand

- Metalle
 - Widerstand ändert sich linear mit Temp.
 - oft: Platin \rightarrow $-200^{\circ}\text{C} - +500^{\circ}\text{C}$
 - Messhäufigkeit beeinflusst Genauigkeit
- Keramik
 - nichtlinear
 - PTC / NTC Widerstände

Thermoelektr. Sensoren

- 2 Metalle nah beieinander
- \rightarrow Messe Spannung zw. Enden
- \rightarrow abh. von Temp. des Kontakts

Infrarot

- Material strahlt Hitze als IR-Wellen ab
- kontaktlose Messung

Propriozeption - Selbstsinn

Mensch: Regelkreis

- \rightarrow Wahrnehmung der Muskelzustände, Gelenkstellungen, ...

Roboter: · Motoren statt Muskeln → Propriozeption?

Rotary Encoder

- Gerät, das Winkelpositionen oder Bewegung eines Schfts / Achse in analog/digital code convertiert

Absolut vs. Relativ?

- Relativ: einfacher, aber braucht Kalibrierung ↗
- Absolut:
 - teurer, größer, aber keine Kalibrierung ↗
 - binary encoded ⊖ race conditions
 - gray encoded ⊖ geringere Auflösung

Genussinn

- Mensch: Riehschleimhaut hat spezialisierte Genussrezeptoren
↳ verbunden mit Riechneru
· feuern falls Genuchsmoleküle binden
- KAMINA: Karlsruher Mikronase = Gassensor
· erkennt Genuchsprofile wieder

Hörsinn

- Schallwellen:
 - Lautstärke = Amplitude
 - Pitch = Frequenz

Mensch:

- Hörspektrum $\approx 16\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$

Signaltransduktion

- Trommelfell: Schallwelle ↗ mechan Impuls auf Steigbügel
- Steigbügel → Cochlea (mit Endolymphe gefüllt)
- Cochlea hat Sinneshärchen (verbunden mit Hörnervu)
↳ ausgelenkt bei bestimmter Frequenz \Rightarrow Aktionspotential
 - hohe Freq. nahe Steigbügel
 - tiefe Freq. nahe Helicotrema

Fledermaus Echo

- Ultraschall mit 20kHz - 200kHz
 - Echo aufgenommen, ausgewertet von Ohren
 - ⇒ können sich in absoluter Dunkelheit orientieren
 - Distanz, Richtung, Form
 - Größe, Struktur, Bewegung
- { Klassifikation der Beute

Sonar

- kurze Töne mit bis zu 180kHz
- Unterscheidung von Fischen, Pflanzen, Objekten
- ! nicht angeboren

Sensoren

Ultraschall-Sensor

- Reichweite 2 - 400cm
- Genauigkeit 3mm
- < 5\$

Gleichgewichtssinn

Mensch:

- 3 Bogengänge: Rotationsbeschleunigung
- Saccule + Utricule: Lineare Beschleunigung → Gravity

↪ Härchen in Endolymphe werden verzögert bewegt

- Ruhepotential: Signal auch in Ruhe
⊕ erkenne falls Sensor kaputt

Bildstabilisierung · durch Augenbewegung

Huhn

Bildstabi durch Nackenbewegung

Ameisen

- Beine haben Borstenfelder = Härchen
↳ werden von Gravitation ausgelenkt
- Abdomen von Gravitation ausgelenkt

Sensoren

IMU = Inertial Measurement Unit

- Kombi aus

- Gyroskop = Winkelgeschw.
- Beschl. messer = Lineare Beschl. → Gravitation
- (• Magnetometer)

- ⊖
- Positions berechnung: Doppelte Integration der Beschl.
⇒ Fehlerakkumulation
 - Drifting Problem

Sehsinn

Mensch: Linsenaugen, sichtbares Spektrum 380nm - 780nm

- Linse fokussiert → passt sich an
- Pupille regelt Lichteinfall

Fetina:
- Stäbchen (Hell-Dunkel)
- Zapfen (Farben)

Mantis: 3 Pupillen pro Auge → 12 Wellenlängen Rezeptortypen

Facettenaugen: viele Sinneszellen auf Kugeloberfläche
→ einfache Flow-Berechnung

Sensoren

- Kamera:
- CCD: Linie für Linie der Pixel scannen
 - CMOS: Pixel für Pixel

⊕ kontinuierl. Werte

⊖ zeitdiskret

- Eventbasiert
- auslösen falls Schwellwert der Intensität überschritten
 - zeigt nur Bewegung
 - ! keine Bewegung = graues Bild
 - bewegte Objekt "segmentiert"

- (+) sehr schnell
- zeitkontin.
- (-) wortdiskret

BEWEGUNGSSTEUERUNG

Elementare Bewegungssteuerung

Natur

- Bewegungsprimitive
- Willkürmotorik
- rhythm. Bewegungsabläufe
- Reflexe

Robotik

- verhaltensbasiert
- höheres Verhalten
- Haltungskontrolle
- Reflexe

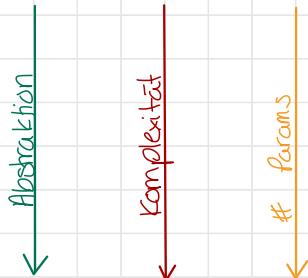
Bio als Vorbild

Mustergenerator → CPG

Reflexe → Reaktive Systeme

Neuronen → KNN

Verhalten → verhaltensbas. Systeme



Steuerung

2 Teile:

- 1) Aufbau / Steuerparadigma
 - z.B. verhaltensbasiertes System, KNN
 - 2) Methode zur parametrisierung des Systems
 - z.B. empirisch, reinforcement learning, genetische Algos, Optimierung
- nicht immer klar trennbar :-)

zB PID - Regler

• DGL: $u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_V \frac{d}{dt} e(t) \right]$

• Überstr.fkt: $\frac{U}{E}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s \right)$

=> theoretisch : 3 Params k_p, T_N, T_V
praktisch viele mehr

Parametrisierung zB.

- empirisch / Maß & Fehler
- Einstellregeln

Parametrisierung von Steuerungen

- Anspruchsvoll!
- Modell basiert = Einstellregeln
- Biologische Untersuchungen
- empirisch (ausprobieren + Expertenwissen)
- systematisch, lernend (ML, GA)

Machine Learning => iterativ durch mehrdim. Gradientenabstieg

Genetische Algos = Problem als Genom repr. => Mutation + Rekombinat.

KNN

Neuron

• menschl. Hirn ≈ 100 Mrd. Neuronen + jeweils ca. 30 Verbindungen

Perzepton

$$y = F \left(\sum_i w_i x_i \right)$$

$w_i > 0$: anregend
 $w_i < 0$: hemmend

F = Übertragungsfkt. (zB sigmoid)

Neuronale Netze

- MLPs
- RNNs
 - direct feedback
 - indirect feedback
 - zeitl. feedback
 - vollst. vernetzt

Spiking Neural Nets

- Neuronenaktivierung als Spikes \rightarrow zeitlicher Verlauf!
- an Knotenpunkten (gewichtet) aufsummieren
- keine direkte Signalweiterleitung Neuron \rightarrow Neuron sondern über chem. Substanzen \cong Modellierung syn. Spalt

Modelle:

- Hodgkin - Huxley
 - ⊕ realistisch
 - ⊖ schwer zu implementieren, hohe Computing Zeiten
- Integrate-and-fire
 - ⊕ effiziente Ableitung des HTM
 - ⊖ nicht auf biologischen Vorbildern beruhend
- Izhikevich's neuron
 - ⊕ Kompromiss zw. Biolog. Plausibilität, Comp. Time
- Spike Response
 - ⊕ mächtig, einfach, allgemein

Codierung

- noch unklar wie genau Signale in Natur codiert werden
→ es scheint: auch Mensch codiert nicht einheitl.
zB Retina: Infos zus. in Amplituden

Techniken:

- Rate Codierung: Spikes selbst codieren Infos (zB Kluskeln)
- Spike-Time-Coding: Zeit zw. Spikes codiert Infos
- stochastisches Coding
- PositionsCodierung
- binary coding

Schwierigkeit: Populationscodierung → Signal durch mehrere Neuronen gemeinsam codiert

Lernen

- Spike Time Dependent
 - Gewichte anpassen je nachdem wann postsyn. Neuron feuert
- Rate Based
 - Anpassung basierend auf prä-, postsyn. Feuerrate
 - ↗ unkontrollierte Gewichtszunahme
 - unselective rezeptive Felder
- Reward Based - Reinforcement Learning
- Voltage Based
 - Anpassung basierend auf Membran-Potentialen

Oszillatoren

Reflexe

- zielgerichtetes, sensorgekoppeltes Verhalten das motorische/vegetative Prozesse auslöst
- Reflexantwort (Latenz, Stärke, Muster) abh. von Intensität der Sensoreregung

z.B. Pupillenlichtreflex:

beide Augen reagieren auf einseitigen Lichteinfall

Reflex: schnelle, automatische, unbewusste Reaktion ausgelöst von sensorischem Stimulus

zB Ball ausweichen

Taxis: Verhalten, die Tier in Richtung (= attraktive) / entgegen(aversive) Stimulus orientieren

zB. Biene nach Sonnenstand, Fliegen weg vom Licht

Feste Muster: Reaktion auf Stimuli, die länger anhalten als Stimuli

zB. Fluchtreflex Hase auch wenn Fuchs nicht mehr zu sehen

Intensität, Geschw.keit der Aktivierung reguliert durch Anzahl, Frequenz von Motorneuronen

Zentraler Mustergenerator = CPG

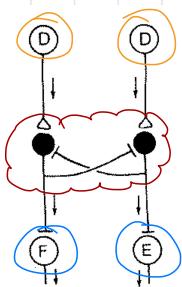
- NN das ohne Sensorfeedback zeitl. Impulse einer rhythm. Motoraktion liefert

zB Rhythmogenese der Atmung:

- 3 rhythm. Aktivitäten gesteuert von respiratorischen Neuronen
 - ↳ Inspiration, Postinspiration, Expiration

Rhythmusgeneratoren

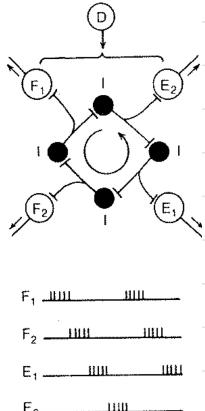
Half-Center-Modell



· Dauererregung durch Driver-Neuronen

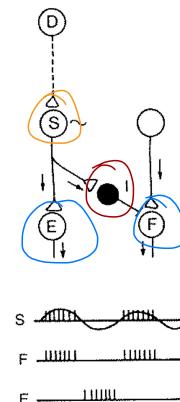
- Interneuronen: Zentren hemmen sich gegenseitig
 - Antagonistisches Prinzip in der Steuerung

Closed-loop-Modell



· feinere Aufteilung in Flexor, Extensor

Schrittmacher-Modell



- Schrittmacher erzeugt Basis-Rhythmus
- durch Interneuronen übertragen auf andere Zentren

Oszillatormodelle

Leaky Integrator Neuron

Membranpotential m_i als DGL:

$$\tau_j \frac{dm_j}{dt} = -m_j + \underbrace{\sum_i w_{ij} x_i}_{\text{Input}}$$

$$\rightarrow \text{Ausgabefunktion } x_j = \frac{1}{1 + e^{-(m_j + b_j)}}$$

Matsuoka Oszillatoren

= Half-Center-Modell

> einzelnes Neuron

$$T_r \dot{x}_i + x_i = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ij} y_j + c - bf$$

$$Ta \cdot \dot{f} + f = y \quad y = \max(0, x) = \text{relu}(x)$$

y_i = Aktivierung ($i=0 \rightarrow$ eigene)

x = Membranpotential

c = äußere Anregung

f = Anpassungsgrad

b = Param: stationäre Feuerrate

T_r, a = Zeitkonstanten rise/adapt

> Oszillator

$$T_r \dot{x}_i + x_i = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ij} y_j + c - bf + \sum_{k=1}^m v_k \underset{\text{Sensorinput}}{\text{Senk}}$$

$$Ta \cdot \dot{f}_i + f_i = y_i \quad y_i = \max(0, x_i)$$

=> bei Störungen kehrt der Oszillator wieder zum Ruhezustand zurück

~ aber auch möglich: durch Sensorinput Schnittfrequenz / Gangart / Laufmuster ändern

Natur

Frage: gibt es CPGs in der Natur

- Antagonistisches Prinzip auch in Steuerung
-> Motoneuronen der Gegenspieler hemmen/lernen sich gegenseitig
- Cluster Generatoren gibt es, aber auch einen zentralen ohne Sensorfeedback?

Evaluation künstl. Neuro-Oszillatoren



- gutes Attraktor-Verhalten → Rückkehr zu stabilem Rhythmus
- einfacher Aufbau (→ wenige Neuronen)
- große Funktionalität
- Einsatz ohne Sensorfeedback (open loop) möglich



- ohne Erweiterungen: Störungsanfällig (robust durch Reflexe)



- schwer zu parametrisieren
- komplexe mathem. Modellierung
- schwer beherrschbar bei komplexer Kinematik

Anwendungen

Stabheuschrecke

- Insekten haben freien Gang \rightarrow kein festes Laufmuster
- zB Stabheuschrecke: Mix aus Tripod, Tetrapod
- \Rightarrow Koordination der Beine durch feste Regeln

Cruse - Regeln

R1: Schwingphase hinteres Bein hemmt Start Schwingphase vorderes Bein

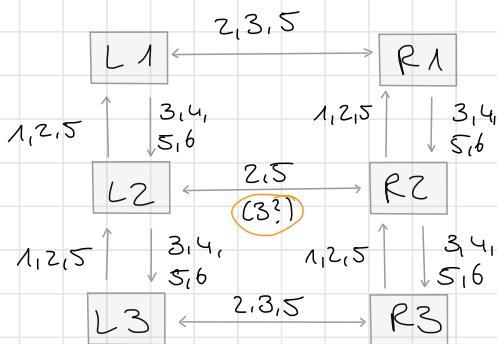
R2: Beginn Stemmphase hinteres Bein löst Start Schwingphase vorderes Bein aus

R3: Beinpos. vorderes Bein während Stemmphase reizt Start Schwingphase hinteres Bein

R4: End-Pos vorderes Bein beeinflusst Ende Schwingphase hinteres Bein
zB falls sichere Pos mit Vorderbein \rightarrow platziere Hinterbein da

R5: Erhöhter Widerstand erfordert erhöhte Stemmkraft

R6: Tread-on-Tarsus Reflex \rightarrow falls auf eigenes Bein getreten: hebe Bein wieder an



\Rightarrow Schwingt manchmal mit beiden mittleren Beinen gleichzeitig

Walk-Net = NN zur Steuerung

- ein Netz pro Bein
- nicht 100%ige Synchronisation erlaubt hohe Reaktionsfähigkeit
z.B. gut für Kurven oder schwierige Situationen
- ~ System passt sich dynamisch an
- > Beine organisieren sich selbst

Neurulae

- einer der primitivsten Wirbeltiere → wenige Neuronen
- weitreichende neuro-biol. Untersuchungen
- Nachbau: Leaky-Integrator-Neuronen-Netzwerk
⇒ 3 DGLs pro Neuron

Salamander

- 4 Beiner
- Leaky-Integrator-Modell
→ generiert durch evolutionäre Algos

Tekken

- Neuro-Oszillatoren nach Matsuoka
→ robustes Laufen über Steine, Stufen

MEHRBEINIGE LOKOMOTION

Lokomotion = aktive Fortbewegung eines Lebewesens

Lokomotionsarten Land

Kriechen: Körperunterseite hat immer Bodenkontakt

→ beinlose Wirbeltiere (Schlangen, Reptilien, ...)

⊕ sehr stabil

⊖ langsam

Hüpfen: · vollst. Flugphase vorhanden (kein Bodenkontakt)

· typisch: ballistische Flugbahn, lange Flugphase

→ in Natur eher selten; Känguru, Frosch

⊕ dynamisch, schnell

Laufen: · wiederkehrender Wechsel des Bodenkontakts

· Unterschl. Gehen, Rennen

· unterschl. Laufmuster je nach # Beine

→ Wirbellose, Wirbeltiere, fast alle ☺

Brachiation: = Hängeln → Sonderfall, zB Affen

Stabilität

· Laufbos brauchen aktive Stabilisierung

= Entwickler muss sich Gedanken machen

z.B. nicht zu viele Beine haben

Körperschwerpunkt ausregeln

· Stabilität abh. vom Laufmuster

Faustregel: je mehr Beine, desto einfacher ist Stabilität

Statische Stabilität

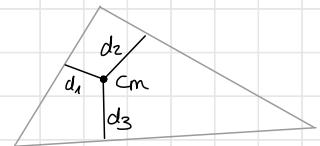
= Laufbewegung kann zu beliebigem Zeitpunkt eingefroren werden und System bleibt stehen

Kriterien

- mind 3 Beine haben Bodenkontakt
- Projektierter Schwerpunkt liegt innerhalb Aufstandspolygon
= Verbindung aller Beine mit Bodenkontakt

Stabilitätsmaße

Stability Margin: min. Abstand des Schwerpunkts zu beliebigem Rand des Aufstandspolygons



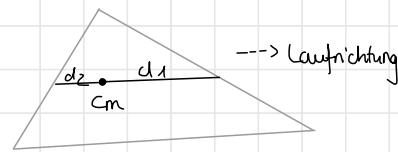
$$S_m = \min(d_1, d_2, d_3)$$

Longitudinal Stability Margin:

min. Abstand des Schwerpunkts zu Rand in Laufrichtung

=> # Beine, Abstand der Beine haben Einfluss

=> Entwickler kann Einfluss auf Stabilität nehmen



$$S_L = \min(d_1, d_2)$$

dynamische Stabilität

- System bleibt bei fortschreitender Bewegung stabil
- Geschw.keiten, Trägheitsmomente müssen berücksichtigt werden
=> komplexer!

Kriterien

- Center of Pressure Method (COP)
- dynamic stability margin (DSM)
- tumble stability margin (TSM)
- normalized dynamic energy stability margin (NDESM)

• Zero Moment Point (ZMP):

- Bodenkontakt verteilt sich über ges. Fuß
 \leadsto Fußpunkte p_i mit Kräften $f_i = [f_{ix}, f_{iy}, f_{iz}]$

- Zero Moment Point \approx ein einzelner "Drehpunkt" am Boden

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{p}_i \cdot f_{iz}}{\sum_{i=1}^N f_{iz}}$$

\Rightarrow Drehmomente der Fußpunkte als $\vec{\tau} = \sum_{i=1}^N (\vec{p}_i - \vec{P}) \times \vec{f}_i$

- . Annahme: Boden ist eben, also $p_z - P_z = 0$

\Rightarrow seitliche Kippmomente $\tau_x = \tau_y = 0$

$$\tau_z = \sum_{i=1}^N (p_{ix} - p_x) f_{iy} - \sum_{i=1}^N (p_{iy} - p_y) f_{ix}$$

- stabil, falls ZMP im Aufstandspolygon / Fußbereich liegt

- statisch: Schwerpunkt auf Boden projizieren

- virtueller ZMP über Robodynamik:

$$\vec{\tau} = -Mg(\vec{x} - \vec{p}) + M\ddot{\vec{x}} z_c$$

$$\vec{p} = \vec{x} - \frac{z_c}{g} \ddot{\vec{x}}$$

• Force-Angle Stability Measure (FASM):

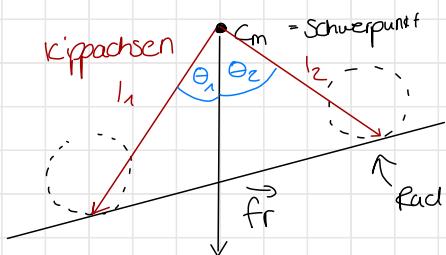
- Stabilität abh. vom Winkel zur Kippachse

$$\vec{x} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N m_i} \sum_{i=0}^N m_i \cdot \vec{x}_i \quad \alpha = \min(\theta_i) \parallel \vec{f}_i \parallel$$

Kippwinkel

\Rightarrow schwerer, niedriger Robo ist stabiler

- + berücksichtigt Höhe
- kann externe Störkräfte berücksichtigen
- Berechnung schnell, effizient



Input = Schwerpunkt (C_m), Gewichtskraft auf C_m , externe Kräfte, Momente Fußpunkte

Laufmuster

- haben wesentl. Einfluss auf Leistungsfähigkeit
→ Stabilität, Geschwindigkeit, Effizienz

Gait - Diagramm

x - Achse = zeitl. Verlauf
y - Achse = Schwingphasen, Stemmphasen (als Balken) = Bodenkontakt

Phase - Shift

- Laufmuster beschreiben durch Phasenverschiebung zw. Beinen:

$$\phi_i = \frac{\text{Beginn Stemphase Bein } i}{T}$$

→ braucht Referenzbein als Bezug

Duty - Factor = Belastungsfaktor

- relativer Anteil Stemphase zu Gesamtzykluszeit

$$\beta_i = \frac{\text{Stemzeit Bein } i}{T}$$

$$T = \text{Gesamtzykluszeit} = \text{Schwingzeit} + \text{Stem Zeit}$$

Unterscheidungskriterien

1. Anzahl Beine

2 / 4 / 6 / 8 / Mehrbeinig

2. Symmetrie

- **Symmetrisch** = Phasenverschiebung eines Beinpaares
immer gleich
→ also phase-shift = 0,5

z.B. LF, LH

- **asymmetrisch** = alles andere

3. zyklische Muster

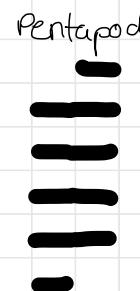
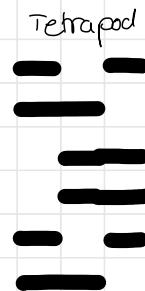
- gibt es wiederkehrendes Muster?
 - in Natur: nicht zwingend erkennbar
 - wechselnde Bodenbeschaffenheit / Unebenheiten / ständiger Wechsel zw. 2 Laufmustern
 - phase-shift zw. Beinen, duty-factor konstant

4. Anzahl Beine mit Bodenkontakt

- mehr Beine mit Bod.kon. ⇒ stabiler

6 - Beiner

- Tripod: immer ≥ 3 schnellerster
- Tetrapod: immer ≥ 4 } Mix: Cruise - Regeln
- Pentapod: immer ≥ 5 langsamster



- Free - Gait: Freies Laufmuster → sehr flexibel
→ gut für schweres Terrain

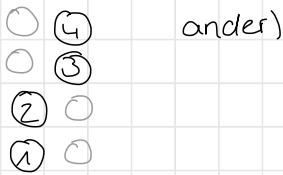
ZB: Regel: wenn linker, rechter Nachbar Bodenkontakt:

Bein darf schwingen

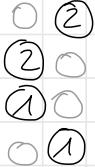
- > Wechsel zw. Laufmustern möglich
 - sehr natürlich
 - ähnlich zu Cruise 1

4-Beiner laufende Muster

- mind. 1 Bein auf Boden
 - Walk • Amble (zeitl. etwas)



- Trott (schnellere Abfolge → immer Wechsel von 2 auf 3 Beinen)



- Creeping Gate (immer 1 Bein schwingt)
 - Crawl Gate = optimiertes Creep. G.
→ max. Stabilität

} sehr langsam → Cm muss verlagert werden
↳ unnatürlich, aber sehr stabil

- langsamstes Laufmuster Natur: Schildkröte (heben aber auch 2 Beine)

Rennende Muster

- Flugphase vorhanden → kein Bein auf Boden

Pace

Flugphase

○ (2)

○ (2)

Flugphase

① ○

① ○

Leichter Galopp / Galopp

zB Pferde

Flugphase

③ ○

○ (2)

② ○

○ (1)

transverse Gallop

Flugphase

○ (4)

(3) ○

○ (2)

① ○

rotary Gallop

Flugphase

○ (4)

(3) ○

Flugphase

② ○

○ (1)

2-Beiner

Lauen

- schneller
- Flugphase

- duty-factor $\leq 0,5$

vs

Gehen

- langsamer
- keine Flugphase
- → kurze Überlappung beider Beine auf Boden
- $> 0,5$

Mehrbeiner

CPG - basiert

→ 4 gekoppelte Oszillatoren erzeugen versch Laufmuster

→ stabile Eigenschwingungen die natürlichem Laufmuster entsprechen

Z-beiniges laufen

Klassisch: starre Mechanik + Antriebe + klassische Regelungstechnik
z.B. ASIMO, HRP2, Johnnie

alternativ: elastische Antriebe (zB Muskeln) + biolog. motivierte Steuerungen
z.B. passive dynamic Walker, hüpfende Robos

Passive dynamic Walker

- Stemphase: Bein ausgestreckt
- Schwingphase: Knie gebeugt
- Fuß ist abgerundet

Selbststabilisierung

Modelle menschl. Laufen:

- Hatze: neuronales Muskel - Skelett - Modell
- Günther: verallg. mech. Modell
- Henzel Pratt: virtual Model Control
- Blickhan: Feder-Masse - System

→ Informationsverarbeitung in der Mechanik

⇒ a) Schnelle Lokomotion: Muskel-Skelett-System kann Schwerpunkt nicht mehr kontinuierlich stabilisieren

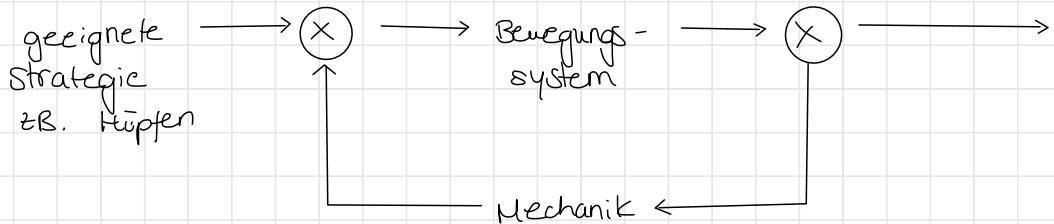
b) Bein-Mechanik muss selbststabilisierenden Zyklus einstellen

c) Reflex-Preflex: Nervensystem stellt Mechanik anhand eines kinematischen Programms immer wieder neu ein

energetische Topographie = Karte mit Energie



Regelkreis

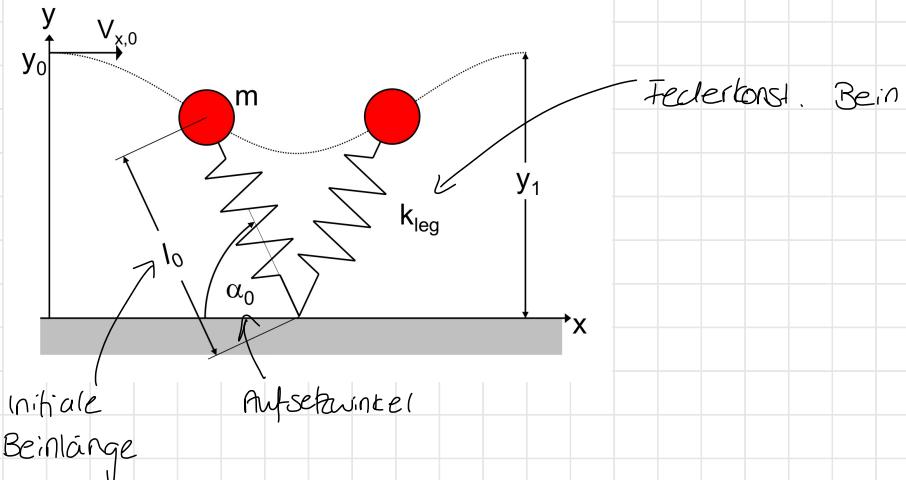


Störungen:

- innere: Verletzungen, ...
- äußere: Stöße, Untergrund, ...

Feder - Masse - System

- modelliere Feder-Dämpfer-Verhalten bid. Muskeln
 - > Abstrakt als Federn
 - ↳ einfedern beim Auftreten
 - ausfedern beim Abtreten



- es gibt Eigenfrequenz abh. von Aufsetzwinkel, Federkonstante
- => ZNS: hat versch. kinematische Programme zur Anpassung
→ weiß auch welche Winkel funktionieren

Übergang Gehen -> Rennen

Verhältnis Schwingen/
Stemmen

Gehen

> 0,5

Rennen

< 0,5

support

double

single

Bodenkontakt

2, Lang

1, Kurz

→ zueinig! Kraftmuster in z

→ einkügl. Kraftmuster in z

Bewegung

glatt

hüpfig

Bein

steif

elastisch

Speed Gap

z. Gehen, Laufen kein kontin. Übergang → es gibt nicht alle Zwischen geschw. Weiten

→ Änderung Anstellwinkel, Federkonstante

RECHNERARCHITEKTUREN

Nervensystem

Input mit Mbit - Gbit/s → Output mit Mbit/s
aber Verarbeitung nur 10 - 100 bit/s
⇒ Kompression, Abstraktion der Infos

Neuronen = Basisrecheneinheit

Funktionsweise

- Reiz → Rezeptor
 - falls größer Schwellwert: Aktionspotential (Spike) am Rezeptor
 - Weiterleitung über präsyn. Nerv zur Synapse
 - postsyn. Potential
 - falls größer Schwellwert: Aktionspotential
 - Weiterleitung
 - ...

Nervenfaser

- Weiterleitung über Membran → Reizkette entlang Membran

Ruhepot.:
- Innen viele K^+ → Normalpot. $-2,931\text{ mV}$ ↗ Innen rund
- Außen viele Na^+ → $-2,713\text{ mV}$ ↗ 70mV
- Na^+ Kanäle zu
- wenige K^+ offen
negativer!

Reiz:
- einige Na^+ Kanäle öffnen
→ ab Schwellwert alle
- Zellinneres wird positiv
⇒ AKTIONSPOTENTIAL
- Na^+ Kanäle schließen, K^+ Kanäle öffnen
⇒ Rückkehr zu Ruhepot.

Nervenzelle

- Zellkörper : Zellkern + biochem. Versorgung (Mitochondrien, ...)
- Dendriten : Zellfortsätze, stark verzweigt
→ empfängt Signal
- Nervenfaser : langer, dünner Zellfortsatz (meist 1)
→ Signalweiterleitung
- Myelin : umgibt Nervenfaser = "Isolierung"
- Axon : An-dockstelle für andere Nervenzellen
⇒ Ausbildung syn. Spalt

Synapsen

- erregende Synapsen eher weiter weg vom Axon / an Dendriten
- hemmende nah am Axon
- Stärke des postsyn. Potential abh. von
 - # Neurotransmittern
 - # Ionenkanäle in Dendriten
- Plastizität : Änderung einer dieser Zahlen
→ abh. von Spiketiming
- Spiketrain : "neurons who fire together wire together"

Gehirn

- Kleinhirn = Cerebellum : Bewegungskoordination

Stabschrecke

- intelligente Einheiten je nach gefordertem Steuerungsverhalten
 - adaptives Verhalten
 - Kommunikation untereinander auf Verhaltensebene
- hierarchische, verteilte Steuerung

Hardware

Anforderungen

- Komplexes Verhalten
- Sicherheit
- Fehler Toleranz
- Skalierbarkeit
- Modularität
- Echtzeitfähigkeit

Probleme

- Platzmangel
- Gewicht von Komponenten
- Energieversorgung
- Energieeffizienz
- Resistenz gegen
 - hohe Temperaturen
 - (elektromagn.) Störungen

Energieversorgung

→ Hardware: elektr. Energie

Problem: schlecht kompakt speicherbar

Batterien: schwer, groß, kurze Laufzeit, lange Ladezeit
 ~ besser mit LiPo Akkus

Brennstoffzellen: noch in Erprobung

Komponenten

Mikrocontroller

- Mikroprozessor (Steuerwerk, Rechenwerk)
- Speicher
- I/O
- Peripheriegeräte

Digitale Signalprozessoren (DSP)

- optimiert auf digitale Signalverarbeitung
- bei Arithmetik leistungsfähiger als Mikrocontroller

Programmable Logic Device (PLD)

- progr. bare Logik - Operationen
- schnell bei parallelen Prozessen

Universal Controller Module (UCOM)

- bis zu 3 Motoren regelbar
- Chips relativ alt

Trends

- kleinere Chips
 - mehr Leistung
 - billiger
- } · mehr private Robos (Staubsauger, ...)
- } · mehr Intelligenz für Robos

Bussysteme

Topologien

- Linie
- Ring
- Stern
- Baum
- Gemischt

Übertragungsarten

elektrisch

- Signale als elektr. Impulse
- (+) · einfache Verkabelung
- flexible Leitungen
- (-) · anfällig für elektromagn. Störungen

optisch

- Signale als gepulstes Licht über Lichtwellenleiter
- (+) · unempf. für elektromagn. Störungen
- leichte Lichtwellenleiter
- (-) · Ansteuerung, Verlegen schwierig

Bussysteme

- CAN
- Flex Ray
- Profibus
- Firewire
- SERCOS
- USB 1.1, 2.3, ...

Neuromorphe Hardware

- spezielle HW zur Simulation von Neuronen
- geringe Leistungsaufnahme
- sehr parallel

ZB Human Brain Project

Spiky

- Neuronen = RC Glieder
- extrem schnell (schneller als Hirn!)

Vergleich

	Natur	Technik
Parallelität	sehr hoch	niedrig - mittel
Redundanz	sehr hoch	niedrig
Fehlertoleranz	sehr hoch	niedrig
Selbstheilung / Rekonstruktion	in gewissem Maße ja	nein
Verarbeitungsgeschw.	niedrig	hoch
Übertragungsgeschw.	niedrig	hoch
Schnittstellen	hoch	niedrig

LERNENDE ROBOTER

ML Methoden

Reinforcement Learning

- (+) · kein Modell nötig → Modellwissen nützlich für reward Funktion
- freie Wahl der reward Funktion
- mehrere Ziele möglich
- keine gelabelten Daten nötig

- (-) · Interaktion richtig
- exploration ggf. gefährlich
- Lernen sollte in Simulation sein
- Transfer auf echte Welt?
- lokale Minima
- Ergebnis stark abh. von reward Funktion

Imitation Learning

- (+) · keine gelabelten Daten nötig
- jeder kann Training durchführen
- kein Modell nötig

- (-) · braucht viele Demos
- Trainingsdaten müssen verarbeitet werden
- Abstraktion vom Mensch?
Transfer auf Robo?

Supervised Learning

- (+) · super Resultate
- kein Modell nötig
- gut für zB Sensordatensegmentierung

- (-) · Overfitting / schlechte Generalisierung
- langes Training
- große Datensets mit Labels nötig

Unsupervised Learning

- (+) · keine gelabelten Daten nötig
- kein Modell nötig
- Selbstoptimierend
- findet verborgene Muster/Strukturen

- (-) · Ergebnisse schwer kontrollierbar
- schwer verständlich, erklärbare
- langes Training
- große Datensets nötig

Lernen : Mensch

Vermutung: - versch. Lernstrategien in versch. Hirnbereichen
· ständiger Infoaustausch über Thalamus

Graphirnrinde: unsupervised learning

Basalganglien: reinforcement, imitation learning

Kleinhirn: supervised learning

Synapsen

Plastizität abh. von Spike timing

- Long Term Potentiation (+) → Plast. stärker je mehr Neuronen in Kette nacheinander feuern
- Long Term Depression (-) → Plast. schwächer falls j vor i feuert (Keine Rückwärtsverb.)
Spike Train $(i) \rightarrow (j)$

⇒ lokales, inkrementelles Lernen

Strukturänderungen

- Kreieren, Zerstören von Synapsen → Veränderungen während Lernen

Spiegelneuronen

- feuern falls Aktion ausgetragen ODER beobachtet
- perzeptuelle, motorische Repr. verknüpft

Lernstrategien Roboter

Klassische Steuerung:

- hierarchisch, modular
- mathem. komplex
- Singularitäten

Zustandsautomat



Planer



Inverse Kinematik



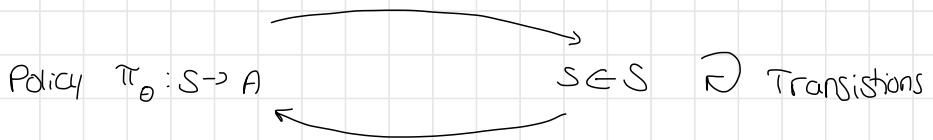
Gelenkregler

Steuerung lernen

- Task definition
 - Reward / Kostenfunktion
 - Demonstration
- Generalisieren für andere Tasks
 - Intentionsverständnis
 - Attention Mechanismen

→ Vereinfachtes Modell:

$S = \text{states}$, $A = \text{actions}$



Ziel: finde Params Θ , sodass Zielfkt $J(\Theta)$ minimiert

1. Zielfunction festlegen = was heißt "intelligent"

2. Lernen = optimiere Zielfunction durch Gradient Descent
Probleme:

- Lokale Minima \rightarrow andere Init Params, Stochastik
- Sattelpunkte \rightarrow Momentum, längeres Training

Optimal Control

Taskdef.: Kosten pro Aktion (Nutzerdef.)

- modellbasiert : state-trans. + cost func. bekannt
→ braucht keine Daten: "simulation" Kosten jeder Aktion in jedem Zustand möglich
⇒ ist nur Optimierung KERN lernen

⊖

- Statetrans. realer Welt unbekannt
- Policies werden in Simulationen gelernt → ungenaue Physik
→ Transfer?

Reinforcement Learning

Taskdef.: reward function (Nutzerdef.)

- ohne Modell (Modell kann gelernt werden) : state-trans. unbekannt
→ Robo muss explorieren
- Zielfkt oft als expected reward → zukünftige Actions mitbewerten
- ⊖
 - gute reward func. schwierig
 - braucht viele Samples / Wiederholungen
→ langsam, deshalb oft Simulationen → Transfer?
 - Verschleiß durch häufiges Wdh.
 - Schaden durch Exploration möglich

Unsupervised Learning

Closed-Loop

- keine präzise Taskdef. möglich
- kann genutzt werden um Modelle zu generieren
⇒ Embodiment = lerne Verständnis über eigene Physik/Umwelt

Playful Machines

- online learning, keine Trainings-/Testphase
- lerne Policy → Voraussage von zukünft. Zuständen

→ Ziel: min. prediction error

- Nähe an Natur: Babys lernen Zusammenhänge zw. Bewegung / Resultat → probieren viel aus

⊖ · kein Ziel definierbar

Demonstrationen

· Taskdef. über Demo

→ Nutzer bringt Robo Task bei ohne coden

Robot teach-in

· geführte Bewegung

· kein Lernen → keine Generalisierung

· Zustände bekannt

Zustände, Aktionen bekannt

3 mögl. Methoden:

≈ Behavioral cloning

- Policy direkt lernen → klassisches supervised learning, keine Exploration
- State trans. + reward lernen → inverses reinforcement learning
- Pläne lernen

... unbekannt

Probleme:

- Demo von anderem Körper (andere Gelenke / Fähigkeiten ...)
- Ausführung der Aktionen unbekannt
- anderer viewpoint

Möglichkeiten:

- One-Shot imitation learning → Generalis. anhand 1 Demo

MUTATION, EVOLUTION, REKOMBINATION

Gen = DNA Abschnitt

Genom = Erbgut = Gesamtheit der Erbinfo

Chromosom = "aufgewickelte" DNA, enthalten Gene

Allel = mögliche Ausprägung eines Gens

heterozygot = Mischherbig \rightarrow Allele eines Gens verschieden

homozigot = Reinerbig \rightarrow gleich

polyzygot = jedes Gen liegt in mehrfacher Ausführung vor
z.B. Mensch: diploid

Vererbung

Mendelsche Gesetze

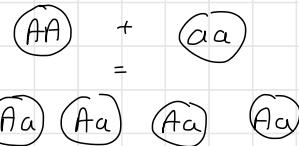
Bedingungen

1) Paarung homozygoter Eltern

2) Eltern unterscheiden sich

1. Uniformitätsgesetz

Alle F1-Hybride sind uniform



2. Spaltungsgebot

Die F2-Hybride als Nachkommen der heterozyg. F1 sind nicht uniform

1/4 AA
2/4 Aa
1/4 aa

=> Erbgänge

- dominant - rezessiv

- intermediär

- Kodominant (beide Merkmale separat ausgebildet)

3. Unabhängigkeitsregel (eingeschränkt gültig)

Verschiedene Alleelpaare werden unabh. vererbt

(z.B. Augenfarbe und Nasenform)

Zellteilung

Meiose = Reifeteilung

- # Chromosomen wird halbiert

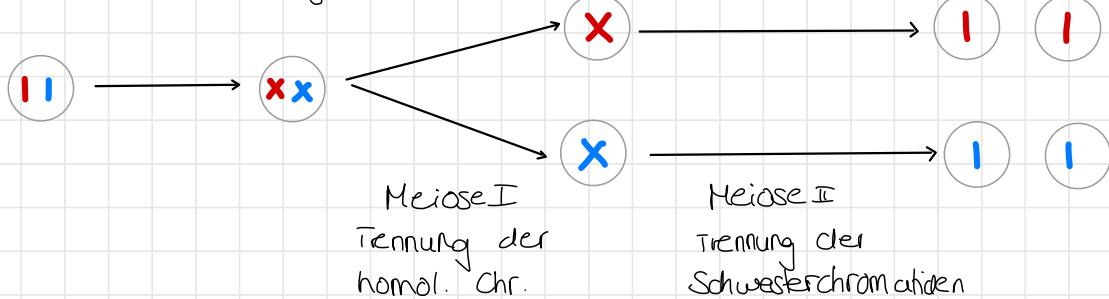
→ Rekomb. elterl. Chrom. ergibt vollst. Chromosomensatz

diploide
Elternzelle

Replikation
homol. Chrom.
(Crossing over)

haploide Zelle
mit doppelten Chrom.

haploide
Tochterzellen



Mitose

- gewöhnliche Zellteilung → identische Kopie
- keine Rekombination von Chromosomen

Evolution

Rekombination

diskret = komplett Gene ausgetauscht
Merkmale entwickeln sich nach Dominanz / Kodominanz

intermediär = Bildung von Mischformen
Merkmale bilden zsm neue Ausprägung

Mutation

- Genommutation (Mono- / Trisomie)
- Chromosomenmutation (Verlust, Verdopplung, Hinzufügen, Drehung)
- Genmutation

Genetische Algorithmen

Selektion = treibende Kraft der Evolution

=> Zufall + Selektion um automatisch angepasste Systeme zu erzeugen

Fitnessfunktion = zu optimierende Bewertungsfkt.

Individuum / Hypothese = einzelne Lösung

Population, Generation = Lösungsmenge

Erzeugen von Nachkommen = generieren neuer Lösungen

genetische Operatoren = Rekombination, Mutation

veränderter Nachkomme, Kind = neue Lösung

Selektion = Auswahl der Lösungen, die die beste Optimierung erzeugt

Grundalgo

while : nicht optimal

1. Selektion der Eltern
2. Generierung von Nachkommen
3. Fitness-Bewertung
4. Selektion der Populationsmitglieder

Nachkommen Generierung

Exploration



Exploitation

Untersuchen des Raumes

· geringere Wkt besserer

Nachkommen zu erzeugen

lokale Optimierung

· Gefahr lokaler Minima

=> Explorationsfaktor abh. von aktueller Fitness der Generation

zB: Ackley's Funktion: besteht aus vielen lokalen Min. + 1 globales
=> benötige Explor. + Exploit.

Individuencodierung

- Wissen / Info strukturiert repräsentieren
→ welche? wie viel?
- Art der Codierung?
 - Binär: genetische Algos
 - reelle Zahlen: evolutionäre Strategien

Mutation

- Nachkomme hat 1 Elter:
 - > Bit-Mutation
 - alle Bits unabh. zufällig invertiert
 - zufällige Indizes mit fixer #
 - stochastisch
 - > Sequenzen
 - Teilsequenz rausnehmen, an anderer Stelle (invertiert) einfügen
- Nachkomme hat ≥ 2 Eltern:
 - > diskrete Rekombination $\begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{matrix} \rightarrow x_1 y_2 x_3$
 - > intermediäre Rekombi $\frac{x_i + y_i}{2}$
 - > Crossover
 - single point: 1 Merkmal vertauscht
 - two-point: 2
 - uniform: abwechselnd x, y vertauschen

Selektion

Probleme:

- genetischer Drift: manche vermehren sich zufällig mehr als andere
- Crowdfitting: "fitte" Individuen dominieren Population
- Eingeschränkte Vielfalt, verlangsamte Konvergenz

Populationsmodelle

- einfache Menge : Selektion der global besten
- Inselmodell : Evolution getrennt, selten Individuen ausgetauscht
- Nachbarschaftsmodell : Nachkommen nur falls Eltern best. Fitness in Nachbarschaft

Populationsmitglieder

- (μ, λ) - Strategie : Auswahl nur unter Nachkommen
→ bessere Exploration
- $(\mu + \lambda)$ - Strategie : Auswahl aus allen (auch Eltern)

Daumenregel : bestes Viertel sollte $\frac{3}{4}$ der Nachkommen erzeugen

Selektionsmethoden

- Fitness-based : abh. von Fitnessfkt $f(x)$
- Ranking-based : abh. vom Ranking von x innerhalb Pop. gemäß $f(x)$
- Tournament : pro zu erzeugendem Individ. : wähle 2 Individ.
→ belohne fitteres
→ wähle Individ. mit höchster Bewertung

⇒ Anwendungsspezifisch, abh. von Codierung

Anwendungen

- Cybermotten
- Snakebot

Künstliche Ontogenese

Ontogenese = struktureller Wandel einer Einheit ohne Verlust ihrer Organisation

zB Raupe → Schmetterling

- repr. Zelle = Kugel → wächst, ab gew. Größe: Teilung
- jede Kugel: NN mit Motorneuronen

Selbstkonfigurierende Roboter

= Einzelsysteme die sich zu komplexen Strukturen zusammen tun

VERHALTENSBASIERTE STEUERUNG

Verhalten im Tierreich

Neurologie

zB Frosch Rückenmark:

- Hypothese: motorische Kontrolle durch Vektorfelder
 - Gliedmaßbewegungen im Rückenmark codiert
 - Ausgelöst durch Anregung an entsprechendem Punkt
 - ZNS (ist entsprechend) Planung Reize aus

Psychologie

Verhaltenspsychologie: Verhalten durch Beobachtung definiert
alles zurückgeführt auf Stimulus - Antwort - Schema

Gestalt-Psychologie: Physik einbeziehen → Verhalten als direkte Konsequenz der Struktur der physischen Umgebung

Kognitive Psychologie: Wissen einbeziehen → Beziehung von Aktion und Perzeption

Ethologie

- = Verhaltensbiologie = Beobachtung tierisches Verhalten in natürl. Umgebung
- Tier = Gesamtsystem das auch Umgebung einbezieht
- Verhalten klassifiziert als Reflexe, Taxe, Feste Muster
- motivierte Verhalten - Antwort auf interne Stimuli

Verhaltensbasierte Robotik

Motivation

- Natur als Vorbild
- Robos sollen einfach, billig sein
- Onboard Berechnungen
- inkrementeller Systemaufbau
- komplexes Verhalten als Kombi einfacher Verhalten
↳ statt komplexe Steuerungssysteme

Steuerung

Deliberativ

= symbolisch

- repr. abh.
- langsame Aw
- obere Ebenen
- variable Latenz

Reaktionsgeschw.



Reaktiv

= Reflex

- repr. unabh.
- Aw in Echtzeit
- untere Ebenen
- einfache Berechnungen

Fähigkeit zur Vorausschau

← Abh.keit von komplexem,
exaktem Weltmodell

hierarchisch

- höhere = abstraktere Ebenen erzeugen Unterziele für niedrigere
- Aufgabe muss zerlegbar sein
- weltmodell je Level garantiert korrekte Ausführung

reakтив

- enge Kopplung Perzeption, Aktion

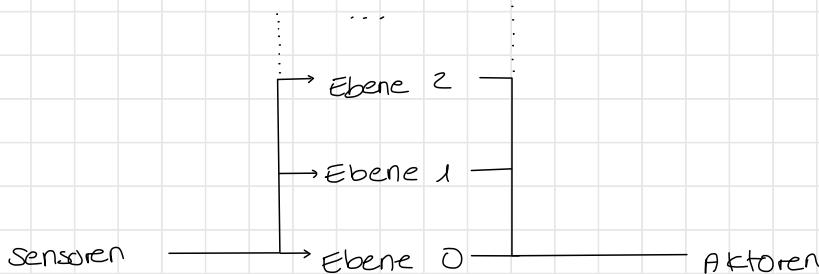
Embodiment = Robo hat phys. Präsenz

Situatedness = Robo als Einheit in Umgebung eingebunden

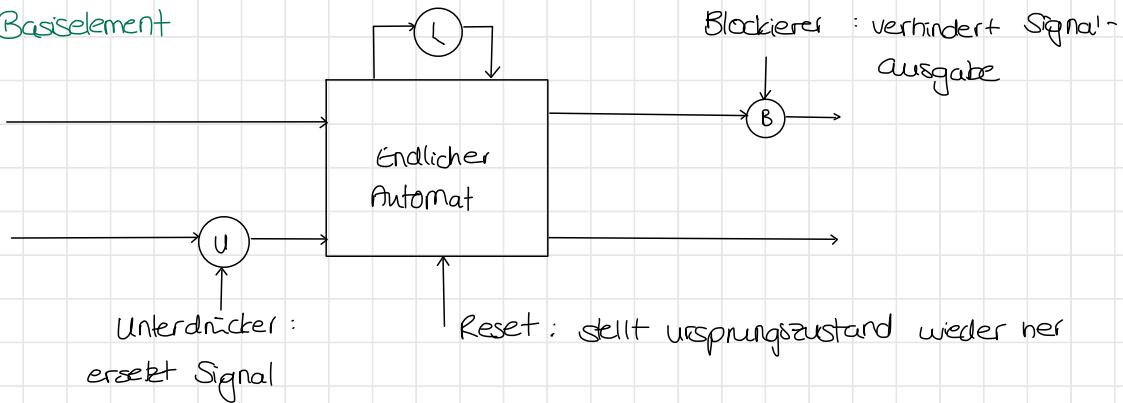
Emergence = Intelligenz durch Interaktion mit Umwelt

Subsumption

- horizontale Schichten
- alle Verhalten greifen auf alle Sensordaten zu, generieren Aktionen für alle Aktoren
→ Interaktion durch Inhibitieren von Eingängen
Überschreiben von Ausgängen
- Rückkopplung durch Umgebung



Basislement



Bewertung

Parallelisierbarkeit

Hw - Abh. Keit

Modular / Erweiterbar

Robustheit

Umgesetzt

Flexibilität zur Laufzeit

Effektive Aufgaben erfüllung

Ja

Ja

Ja, aber nicht beliebig austauschbar
abh. von Modulen

prototypisch

Nein

Ja

Verhaltensnetzwerke

+

- flexibel, adaptiv
- robust → feilaufall \Rightarrow Totalausfall
- bessere Reaktion auf unvorhergesehenes
- asynchron → eigene Zykluseiten je Verhalten
- kleine, einzeln testbare Module
- Parallelisierbar

-

- Verhalten des ges. Systems schwer überschaubar
- viel Aufwand durch Tuning (zB Fusion)

=> abh. von Architektur-Ausprägung

- Koordination, Fusionsprinzip
- Granularität: reaktiv-deliberativ
- Datenformat: diskret-kontinuierlich

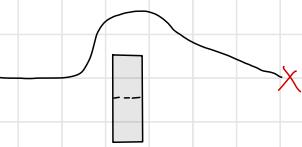
Koordination

Kooperativ

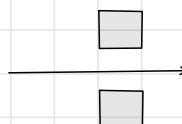
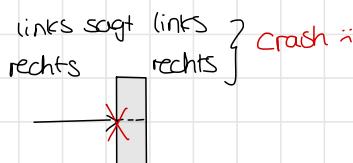
· alle Verhalten bestimmen:

- Aktion

- Stärke vieler Aktionen

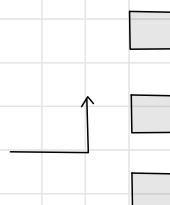
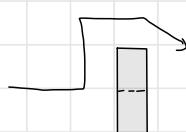
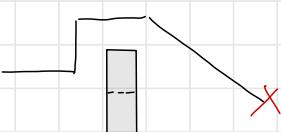


? sprungfreie Aktion



Kompetitiv

- 1 Verhalten bestimmt Aktion \rightarrow überschaubarer, testbarer
- besk Wahl abh. von Situation, Verhalten



Ausgabe Fusion

Wie Verhalten kombinieren?

	coop	comp
Probased		X
Activitybased	X	X
Fuzzy based	X	X
Electionbased	X	
Statebased		X

Probased

- jedes Verhalten hat Prio } Zuweisung durch höhere Verhalten / dynamische Prios Arbiter
- Verhalten mit höchster Prio gewinnt

Activitybased

- jedes Verhalten bestimmt eigene Aktivität
- Auswahl:
 - konkurrenzend: Verhalten mit höchster Aktivität wählt Aktion
 - kooperativ: jede Aktion mit Summe der Aktivitäten gewichtet cues führen

Fuzzy-based

- Fuzzy-function für versch. Aktivitäten
→ Summiere auf
- Defuzzifikation = wie zurück zur Steuerung?
 - Center of Gravity
 - of largest Area } alle problematisch
 - Global Max
- ⇒ noch mehr Params, Skaliert schlecht

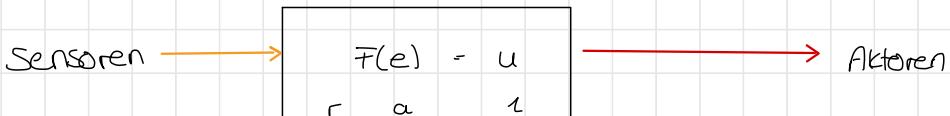
Election based

- endl. Menge def. Aktionen → jedes Verhalten stimmt für Aktion
- # Stimmen pro-based oder activity-based
- Ausführung der Aktion mit meisten Stimmen / gewichtet alle

state-based

- endlicher Automat kontrolliert Verhalten
→ je Zustand darf anderes Verhalten die Aktion bestimmen

Aufbau Verhalten



F = Übertragungsfkt.

r = Zustandsbewertung $\hat{=}$ wie weit weg bin ich vom Ziel?
unzufrieden \Rightarrow größeres r

a = Aktivität $\hat{=}$ wie aktiv bin ich gerade

$\Rightarrow r, a$ sehr hoch: versuche stark Problem zu lösen aber schaffe es nicht

l = Motivation $\hat{=}$ Verhalten an-/ausschalten bzw. skalieren

Fusion = koppeln von Verhalten

- komplementär
- teilredundant

Netzwerke

- Verteilung: reaktive nah am Sensor
deliberative weit weg
- Zustandsbewertung und Aktivität als virtuelle Sensoren
→ nutze interpretierte Daten,
z.B. Beingeschw. sieht: Collisionverhalten sehr aktiv \rightarrow reduziere eigene Laufgeschw.
- Motivation als virtueller Akteur
- Regionen durch virtuelle Akteure, z.B. alle Akteure für Bodenkontakt
- Stress, Angst pro Region berechenbar aus r, a

Bewertung

Parallelisierbarkeit	Ja
Hw - Abh. Keit	Nein
Modular / Erweiterbar	Ja
Robustheit	abh. von Einzelverhalten
Umgesetzt	Prototypisch
Flexibilität zur Laufzeit	beschränkt
Effektive Aufgaben erfüllung	Ja