

Moderne Methoden der KI: Maschinelles Lernen

Prof. Dr. sc. Hans-Dieter Burkhard
Vorlesung Sommer-Semester 2008

1. Einführung:

Definitionen
Grundbegriffe
Lernsysteme

Maschinelles Lernen

- Lernen: Grundbegriffe
- Lernsysteme
- Konzept-Lernen
- Entscheidungsbäume
- Fallbasiertes Schließen
- Reinforcement-Lernen

Mitchell: Machine Learning.

Lenz et al:

Case-Based Reasoning Technology,
From Foundations to Applications.

Quinlan:

C4.5: Programs for Machine Learning.

Definitionen: Was ist Lernen?

Definition nach "Metzler Philosophie Lexikon":

Jede Form von Leistungssteigerung, die durch gezielte Anstrengung erreicht wurde.

bzw. als "psycholog. Sicht":

Jede Verhaltensänderung, die sich auf Erfahrung, Übung oder Beobachtung zurückführen lässt

Was wird verändert - 2 Varianten (nach Metzler)

(1) Stimulus-Response-Verhalten (Assoziationen)

- klassische Konditionierung:
Kopplung an bestehendes Verhalten: Pawlowscher Hund
- operante Konditionierung:
spontane Reaktion bewerten: verstärken/abschwächen

(2) Kognitive Repräsentation ändern

- Umweltmodell
- Problemlösungsstrategien
- Motive
- Gefühle
- . . .

Definitionen: Was ist Lernen?

Definition nach "Meyers Großes Taschenlexikon (1992)":

Durch Erfahrung entstandene, relativ überdauernde Verhaltensänderung bzw. -möglichkeiten.

(Prozess), der bestimmte Organismen, jedoch auch technische Anlagen (z.B. Automaten) befähigt, auf Grund früherer Erfahrungen und durch organ. Eingliederung weiterer Erfahrungen situationsangemessen zu reagieren.

Formen des Lernens (nach Meyer)

- Einsichtiges Lernen (Bewußtsein erforderlich)
- Dressur
- Versuch und Irrtum

Menschl. Lernen ist eine überwiegend einsichtige, aktive, sozial vermittelte Aneignung von Kenntnissen und Fertigkeiten, Überzeugungen und Verhaltensweisen.

Formen des Lernens (nach Meyer)

4 Phasen menschl. Lernens:

- Vorbereitung (Wahrnehmung)
- Aneignung (Assoziation als Verknüpfungsprozeß)
- Speicherung (Kodierung, Gedächtnis)
- Erinnerung (Dekodierung, Reaktion)

Arten/Strukturen des Lernens (nach Meyer)

- Wahrnehmungslernen (Gehörschulung)
 - motorisches Lernen (Schwimmen)
 - verbales Lernen (Vokabeln)
 - kognitives Lernen (Begriffe, Regeln)
 - soziales Lernen (soziales Verhalten)
-
- Signal-Lernen, Verstärkungslernen
 - Imitationslernen
 - Begriffs-/Konzeptlernen
 - Strukturierung
 - Problemlösen

Voraussetzungen für Lernbarkeit

- Gleiches Verhalten in gleicher Situation erfolgreich

Allgemeiner:

- Ähnliches Verhalten in ähnlicher Situation erfolgreich

Möglichkeit zur Verallgemeinerung:
Allgemeine Gültigkeit des an Beispielen Gelernten
(im entsprechenden Bereich)

Aufgabe

Setzen Sie die Zahlenreihe fort:

1, 2, 4, . . .

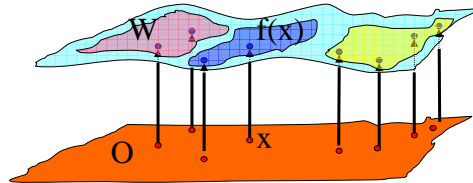
Fragen:

- Was wurde gelernt?
- Warum gerade das?

Allgemeine Gültigkeit des an Beispielen Gelernten

Maschinelles Lernen

- Funktion $f: O \rightarrow W$



- Beispielwerte bekannt
- allgemeine Berechnung unbekannt/zu komplex



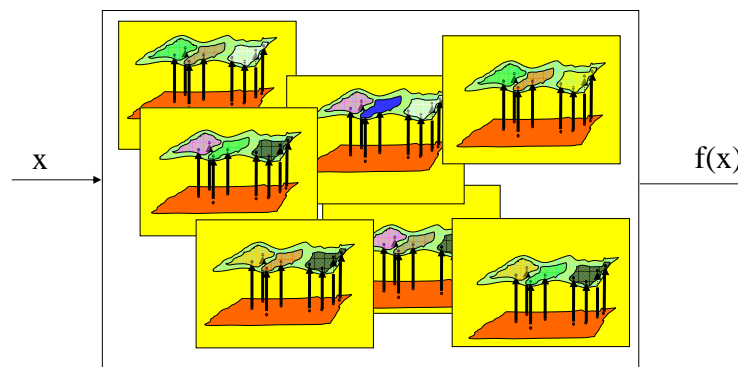
H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

11

Maschinelles Lernen

- Alternativen („Hypothesen“) für Berechnung



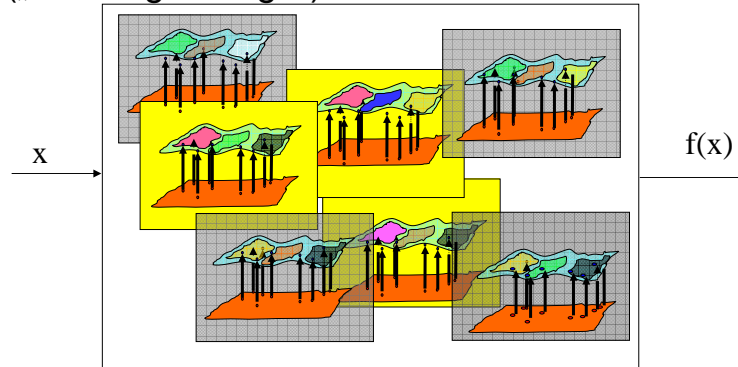
H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

12

Maschinelles Lernen

- Test der Hypothesen anhand der Beispiele („Trainingsmenge“)



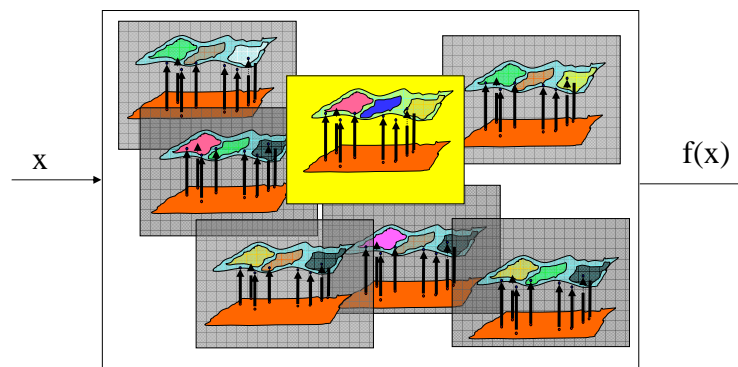
H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

13

Maschinelles Lernen

- Ziel: Korrekte Hypothese finden (Suchproblem)



H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

14

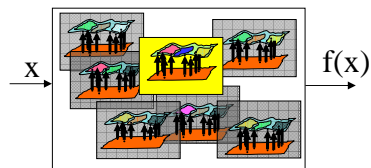
Maschinelles Lernen

Ziel: Korrekte Hypothese finden (Suchproblem)

Methode:

Beispiele („Erfahrungen“) verallgemeinern

Verallgemeinerung = Annahmen über alle Werte



H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

15

Maschinelles Lernen

Bezug zu: Statistik, Optimierung, KI, Kognition, Information, Komplexität, Regelung/Steuerung, Robotik, Philosophie, Psychologie, Biologie, ...

Verfahren: Konzeptlernen, Entscheidungsbäume, Regeln, Fallbasiertes Schließen, Neuronale Netze, Bayessches Lernen, Genetische/Evolutionäre Algorithmen, Verstärkungslernen (Reinforcement L.), ...

Anwendungen: Spracherkennung, Schrifterkennung, Kreditkartenmißbrauch, Data Mining, Profiling, Scheduling, Sensorik und Aktorik von Robotern, ...

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

16

Grundbegriffe 1

- Individuelles Lernen
 - Programm, Roboter
(Ergebnis übertragbar: kopieren)
- Gruppe/Organisation
 - Individuelles Lernen innerhalb Gruppe
 - Struktur, Beziehungen der Gruppe verändern
 - Austausch von Individuen (Evolution)

Grundbegriffe 2: Vorgaben

- Beispiele (Lernmenge)
- Bewertung
 - Mit Lehrer (supervised)
 - Ohne Lehrer (unsupervised)
- Credit Assignment Problem:
 - Was ist korrekt/besser (was wird „belohnt“)
- Verallgemeinerung
 - Verhalten auf nicht präsentierten Beispielen
- Grundstrukturen
 - vorgegebene Repräsentationen: Hypothesen

Definition: Maschinelles Lernen

Definition von Tom M. Mitchell "Machine Learning":

A Computer Program

is said to **learn** from experience E with respect to some class of tasks T and performance measure P ,

if its performance at tasks in T , as measured by P , improves with experience E .

- T : Menge von Aufgaben t
- E : Beispiele bzgl. T
- P : globale Leistungsfähigkeit (Gütemaß)

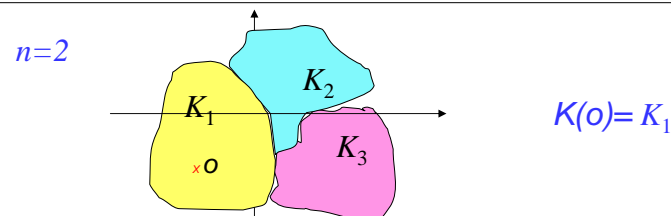
Beispiel: Klassifikation

Menge O von Objekten o

mit jeweils n Merkmalen $m(o) = [m_1, \dots, m_n] \in M$

Klasseneinteilung von O : $K = K_1, \dots, K_k$

Klasse von o : $K(o)$



Beispiel: Klassifikation

- **T**: Menge von Aufgaben t

Klassifikator gesucht: $\kappa: M \rightarrow K$

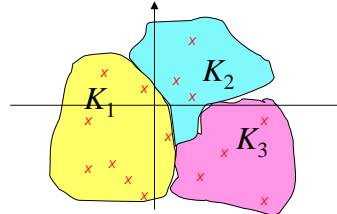
Aufgabe t : Klassifikation $\kappa(m(o))$ für jeweils ein Objekt o

Bewertung: Klassifikation **korrekt**, falls $\kappa(m(o)) \in K(o)$

- **E**: **Beispiele** bzgl. **T**

Paare:

Aufgabe $m(o)$ / Lösung $K(o)$



- **P**: globales **Korrektheitsmaß** des Klassifikators κ

z.B. Anzahl korrekter Klassifikationen / Gesamtzahl

Spezifikation eines Lernsystems

Auswahl aus zahlreichen Möglichkeiten bzgl.

- Aufgabenmenge **T**
- Gütemaß **P**
- Erfahrung **E** (woraus soll **System** lernen):
 - Information
 - Navigation
 - Verteilung
- Verfahren (was soll **System** lernen)
 - inhaltlich
 - formale Repräsentation
- Algorithmus (wie soll **System** lernen)

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Lernverfahren

Auswahl aus Möglichkeiten bzgl.

– Aufgabenmenge T

– Gütemaß P

– Erfahrung E (woraus lernt **System**):

- Information
- Navigation
- Verteilung

– Verfahren (was soll **System** lernen)

- inhaltlich
- formale Repräsentation

– Algorithmus (wie soll **System** lernen)

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

23

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Lernverfahren

• t : individuelle Aufgabe aus Menge T

$V(t)$: Lösung von t gemäß Verfahren V

$B(V(t))$: Bewertung von $V(t)$

optimale Lösung wäre $V^*(t)$

(Verfahren V^* ist unbekannt oder zu aufwendig)

• Lernproblem als
Konstruktions-/Optimierungs-/Suchproblem
für ein Verfahren V , anwendbar für alle $t \in T$,
das im Sinne von P möglichst optimal arbeitet
(Approximation von V^*)

• Gütemaß P :

wieviele Aufgaben t werden durch V wie gut gelöst

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

24

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

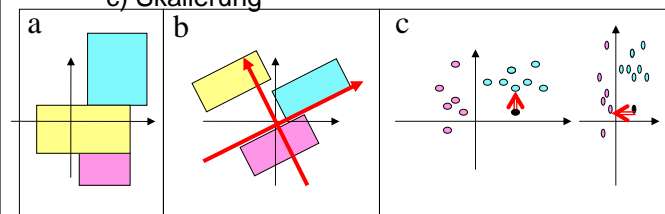
Verfahren

inhaltlich

formal

Algorithmus

- Beschränkung des Suchraumes:
 - Umfang der Aufgabenmenge T
 - Strukturierung der Aufgaben $t \in T$
(Feintuning in grob entwickelter Struktur)
- Merkmale auswählen
 - a) Reduktion von Merkmalen (Redundanz)
 - b) Reduktion von Merkmalen (Transformation)
 - c) Skalierung



H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

25

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Algorithmus

- Information: Beispiele, Fälle $[t,l,b]$
 t : Aufgabe, l : Lösung, b : Bewertung
 - nur *positive* Beispiele $[t,l,+]$ ("gelöste Fälle")
 - *bewertete* Beispiele: $[t,l,b]$
 - direct feedback für Bewertung b
 - als Bestandteil des Falles
 - als unmittelbare Antwort
 - durch Lehrer (supervised learning)
 - indirect feedback für Bewertung b
 - als Antwort auf mehrere Entscheidungen
- Credit Assignment Problem

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

26

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Algorithmus

- Navigation, Auswahl
 - vorgegebene Fälle
 - zufällige Präsentation
 - gezielte Auswahl des Lernalers

- Verteilung:
 - Wie repräsentativ sind Fälle
 - insgesamt
 - bzgl. späterer Anwendung

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

27

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Algorithmus

- "Lösungen" (Wertebereich von V), z.B.:
 - konkreter Lösungsvorschlag
 - Nützlichkeiten alternativer Lösungen
 - Start mit "intuitiver" Anfangsnützlichkeit
 - Ziel: Verbesserung durch Lernen:
Approximation des optimalen Verfahrens V^*

- formale (variierbare) Berechnung von V
 - Auswahl von Merkmalen m_i für Aufgaben t
(Definitionsbereich von V)
 - parametrisierte Berechnungsvorschrift

z.B. gewichtete Summe:

$$V(t) = w_1 m_1 + w_2 m_2 + \dots + w_m m_m$$

(Variation der Parameter w_i beim Lernen)

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

28

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Anpassung der Berechnungsvorschrift für V,
so daß V die Trainingsbeispiele möglichst gut **annähert**

Gütemaß P

Erfahrung E

Information
Navigation
Verteilung

– **Anpassung:**

- Parametervariation
- Übergang zu einer neuen Hypothese
- Konstruktion einer neuen Hypothese

Verfahren

inhaltlich
formal

– **Maß für Annäherung:**

- Übereinstimmung auf Trainingsdaten
- Fehlerminimierung bzgl. Trainingsdaten
- Übereinstimmung mit Vorwissen

Algorithmus

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

29

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Lernsystem als **Suchsystem**

– Zustände: Hypothesen für Zielfunktion, z.B.:

Gütemaß P

– numerische Funktionen

– Klassifikatoren

Erfahrung E

Information
Navigation
Verteilung

– Neuronale Netze

– Entscheidungsbäume

– Regelsysteme

Verfahren

inhaltlich
formal

– Operatoren: Übergang zu neuer Hypothese
anhand von Trainingsbeispielen

– Zielzustand: korrekte/optimale Hypothese
(Approximation der Zielfunktion)

Algorithmus

Algorithmus als Suchverfahren
(nach optimaler Lösung)

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

30

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Algorithmus

- iteriertes Vorgehen
- Testbeispiele zur Evaluierung
- Abbruchkriterien

Ein Schema für ein iteriertes Vorgehen

Schritt i :

- 1) Aufgabe t erzeugen
 - 2) Lösungsvorschlag $V_{i-1}(t)$ mit Verfahren V_{i-1} berechnen,
 - 3) Bewertung $b(V_{i-1}(t))$ (z.B. durch Lehrer)
 - 4) mit Beispiel $[t, V_{i-1}(t), b(V_{i-1}(t))]$ neues Verfahren V_i erzeugen.
- Weiter bei Schritt $i+1$.

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

31

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Algorithmus

Generalisierung:

Das Verfahren V wird nur anhand der Trainingsbeispiele optimiert (und anhand von Testbeispielen evaluiert).

Ziel ist ein optimales Verfahren für alle Aufgaben t .

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

32

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T	Güte des Lernsystems
Gütemaß P	abhängig von allen Design-Entscheidungen sowie folgender Hintergrundannahme:
Erfahrung E Information Navigation Verteilung	Die nicht betrachteten Aufgaben t verhalten sich irgendwie ähnlich wie die bei der Konstruktion verwendeten Aufgaben.
Verfahren inhaltlich formal	Problem: Beachten der zur Generalisierung getroffenen Annahmen (Ähnlichkeit, \Rightarrow inductive bias, ...).
Algorithmus	

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

33

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T	Beispiel:
Gütemaß P	
Erfahrung E Information Navigation Verteilung	Pass-Spiel lernen
Verfahren inhaltlich formal	
Algorithmus	

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2008

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

34

Probleme im Maschinellen Lernen

- Mit welchen Algorithmen kann die Zielfunktion am besten aus speziellen Beispielen (Trainingsmenge) gelernt werden?
- Wie kann die Qualität des gelernten Funktion evaluiert werden (Abbruchbedingung, Anforderungen an Trainingsmenge)?
- Wie kann Vorwissen benutzt werden?
- Wie sollen die Trainingsbeispiele präsentiert werden (Reihenfolge, Korrektheit)?
- Wie kann das Lernen vereinfacht werden (Reduktion von Komplexität, Veränderung der Darstellung)?

ZUSAMMENFASSUNG

- Lernen ist eine wesentliche Eigenschaft von Organismen.
- Lernen spielt in vielen Disziplinen eine Rolle.
- Maschinelles Lernen ist vielseitig einsetzbar, speziell für unbekannte/ schwer beschreibbare/ schwer berechenbare Probleme.
- Lernen kann als Suche (nach der besten Hypothese) betrachtet werden.
- Das Training erfolgt mittels ausgewählter Beispieldaten.
- Durch Generalisierung sollen auch nicht trainierte Aufgaben gelöst werden können.
- Ein Lernproblem umfasst genau spezifizierte Aufgaben, ein Gütemaß und Trainingsbeispiele.
- Die Spezifikation eines Lernsystems umfasst viele Entwurfsentscheidungen.