

Moderne Methoden der KI: Maschinelles Lernen

Prof. Dr. sc. Hans-Dieter Burkhard
Vorlesung Sommer-Semester 2007

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.

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

2

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

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

3

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
- . . .

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

4

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.

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

5

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.

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

6

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, . . .

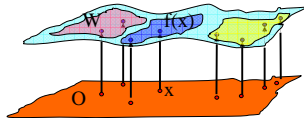
Fragen:

- Was wurde gelernt?
- Warum gerade das?

Allgemeine Gültigkeit des an Beispielen Gelernten

Maschinelles Lernen

- Funktion $f: O \rightarrow W$

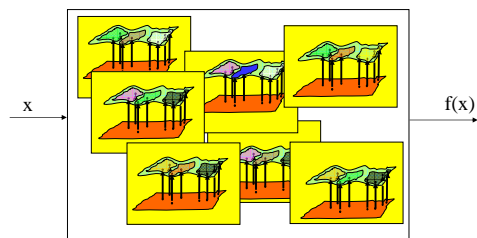


- Beispielwerte bekannt
- allgemeine Berechnung unbekannt/zu komplex



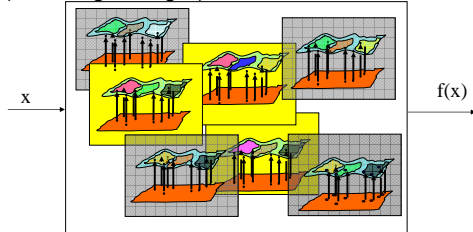
Maschinelles Lernen

- Alternativen („Hypothesen“) für Berechnung



Maschinelles Lernen

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



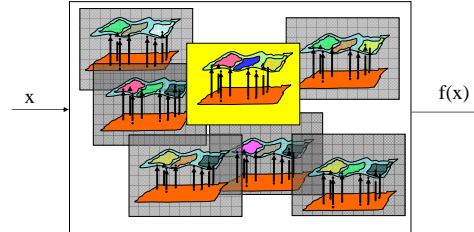
H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

13

Maschinelles Lernen

- Ziel: Korrekte Hypothese finden (Suchproblem)



H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

14

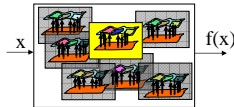
Maschinelles Lernen

Ziel: Korrekte Hypothese finden (Suchproblem)

Methode:

Beispiele („Erfahrungen“) verallgemeinern

Verallgemeinerung = Annahmen über alle Werte



H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

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 2007

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)

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

17

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

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

18

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)

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

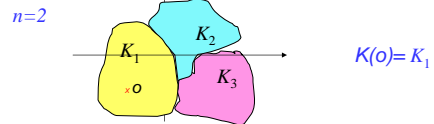
19

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 : $K(o)$



H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

20

Beispiel: Klassifikation

- T : Menge von Aufgaben t

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

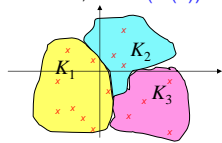
Aufgabe t : Klassifikation $\kappa(m(o))$ für jeweils ein Objekt o

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

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

21

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)

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

22

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 2007

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 2007

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 2007 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 2007 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 Lerners
- Verteilung:
 - Wie repräsentativ sind Fälle
 - insgesamt
 - bzgl. späterer Anwendung

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 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" Anfangsnützlichkeits
 - 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 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung 28

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E
Information
Navigation
Verteilung

Verfahren
inhaltlich
formal

Algorithmus

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

- **Anpassung:**
 - Parametervariation
 - Übergang zu einer neuen Hypothese
 - Konstruktion einer neuen Hypothese
- **Maß für Annäherung:**
 - Übereinstimmung auf Trainingsdaten
 - Fehlerminimierung bzgl. Trainingsdaten
 - Übereinstimmung mit Vorwissen

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung 29

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E
Information
Navigation
Verteilung

Verfahren
inhaltlich
formal

Algorithmus

Lernsystem als Suchsystem

- Zustände: Hypothesen für Zielfunktion, z.B.:
 - numerische Funktionen
 - Klassifikatoren
 - Neuronale Netze
 - Entscheidungsbäume
 - Regelsysteme
- Operatoren: Übergang zu neuer Hypothese anhand von Trainingsbeispielen
- Zielzustand: korrekte/optimale Hypothese (Approximation der Zielfunktion)

Algorithmus als Suchverfahren
(nach optimaler Lösung)

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung 30

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben **T**

- iteriertes Vorgehen
- Testbeispiele zur Evaluierung
- Abbruchkriterien

Gütemaß **P**

Erfahrung **E**
Information
Navigation
Verteilung

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**.

Verfahren
inhaltlich
formal

Algorithmus

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

31

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben **T**

Generalisierung:

Gütemaß **P**

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

Erfahrung **E**
Information
Navigation
Verteilung

Ziel ist ein optimales Verfahren für alle Aufgaben **t**.

Verfahren
inhaltlich
formal

Algorithmus

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

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 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

33

Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben **T**

Beispiel:

Gütemaß **P**

Pass-Spiel lernen

Erfahrung **E**
Information
Navigation
Verteilung

Verfahren
inhaltlich
formal

Algorithmus

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

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)?

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

35

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.

H.D.Burkhard
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

36