

Grundlagen der Sprachsignalerkennung

- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- Worterkennung
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

1

Literatur: Grundlagen, Überblick

-  Manfred R. Schroeder.
Computer speech : recognition, compression, synthesis.
Springer, Berlin, 2004.
-  Andreas Wendemuth.
Grundlagen der stochastischen Sprachverarbeitung.
Oldenbourg, München, 2004.
-  Stephen Euler.
Grundkurs Spracherkennung : vom Sprachsignal zum Dialog ; Grundlagen und Anwendung verstehen.
Vieweg, Wiesbaden, 2006.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

3

Literatur: Worterkennung

-  Sadaoki Furui.
Digital Speech Processing, Synthesis, and Recognition.
Marcel Dekker, New York, 1989.
-  L. R. Rabiner and B. H. Juang.
An introduction to hidden markov models.
IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing Magazine, 3(1):4–16, 1986.
-  Harvey F. Silverman and David P. Morgan.
The application of dynamic programming to connected speech recognition.
IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing Magazine, 7(3):6–25, 1990.
-  Lawrence R. Rabiner.
A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition.
Proceedings of the IEEE, 1989.
-  Joseph Picone.
Continuous speech recognition using hidden markov models.
IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing Magazine, 7(3):26–41, 1990.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

5

Literatur: Sprachmodellierung

-  F. Jelinek.
Self-organized language modeling for speech recognition.
In Alex Waibel and Kai-Fu Lee, editors, *Readings in Speech Recognition*, pages 450–506. Morgan Kaufmann, San Mateo, 1990.
-  Frederick Jelinek.
Statistical methods for speech recognition.
MIT Press, Cambridge, Mass., 1998.
-  Eugene Charniak.
Statistical Language Learning.
MIT Press, Cambridge, MA, 1993.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

7

Literatur: Grundlagen, Überblick

-  Klaus Fellbaum.
Sprachverarbeitung und Sprachübertragung, volume 12 of *Nachrichtentechnik*.
Springer, Berlin, 1984.
-  Alex Waibel and Kai-Fu Lee, editors.
Readings in Speech Recognition.
Morgan Kaufmann, San Mateo CA, 1990.
-  B. Eppinger and E. Herter.
Sprachverarbeitung.
Hanser, München, 1993.
-  Daniel Jurafsky and James H. Martin.
Speech and language processing: An introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition.
Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

2

Literatur: Merkmalsextraktion

-  Ronal W. Schafer and Lawrence R. Rabiner.
Digital representations of speech signals.
Proceedings of the IEEE, 63(4):662–667, 1975.
-  Peter Vary, Ulrich Heute, and Wolfgang Hess.
Digitale Sprachsignalverarbeitung.
B. G. Teubner, Stuttgart, 1998.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

4

Literatur: Worterkennung

-  X. D. Huang, Y. Ariki, and M. A. Jack.
Hidden Markov Models for Speech Recognition.
Edinburgh University Press, Edinburgh, 1990.
-  K. F. Lee.
Automatic Speech Recognition: The Development of the Sphinx System. 4th edition.
Kluwer, Boston, 1999.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

6

Literatur: Dialogmodellierung

-  Michael H. Cohen, James P. Giangola, and Jennifer Balogh.
Voice user interface design.
Addison-Wesley, Boston, Mass., 2004.
-  Deborah Dahl, editor.
Practical spoken dialog systems.
Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 2004.
-  Randy Allen Harris.
Voice interaction design : crafting the new conversational speech systems.
Elsevier/Morgan Kaufmann, Amsterdam, 2005.
-  Michael F. McTear.
Spoken dialogue technology : toward the conversational user interface.
Springer, London, 2004.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

8

Grundlagen der Sprachsignalerkennung

- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- Worterkennung
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Gesprochene Sprache

- zu grobe Beschreibung für gesprochene Sprache
- objektive Tatbestände:
 - Sprachsignal ist kontinuierlich, keine Grenzmarkierungen für Laute und Wörter
 - extrem große, kontextabhängige Varianz: z.B. Assimilationen
 - unvollständige Lautrealisierungen (Elisionen, Verschleifungen)
- subjektiver Eindruck ist das Ergebnis einer hochkomplexen internen Verarbeitungsprozedur

Gesprochene Sprache

- Warum ist Spracherkennung schwierig?

Guten Morgen, Herr Hauptkommissar Thanner. Gibt es irgendetwas Neues im Fall "Verbmobil"?	der Text in "Schönschrift"
Morgen, Thanner. Irgendwas Neues im Fall "Verbmobil"?	spontan gesprochene Sprache
morgenthannerirgendwasneuesimfallverbmobil	Großschreibung? Satzzeichen?
morgenthannerirgendwasneuesimfallverbmobil	kontinuierliche Sprache
moangtannaingwasneuesimfallverpobiehl	Aussprachevarianten
<i>morgenthannerirgendwasneuesimfallverpobiehl</i>	artikulatorische Verschleifung
morgenthannerirgendwasneuesimfallverpobiehl	Störungen und Verzerrungen
morgenthannerirgendwasneuesimfallverpobiehl	Fremdstimmen „Cocktailparty“

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Gesprochene Sprache

- Stellung in der Sprachtheorie
 - gesprochene Sprache ist primär
 - geschriebene Sprache ist sekundär
 - *de facto* jedoch einseitige Dominanz einer idealisierten Sprache (Schriftsprache)
 - starke Auswirkungen auf die (frühen) Arbeiten zur Spracherkennung
- ein simples Modell
 - Buchstabenfolge ↔ "Phonemfolge"
 - $\int \text{pra:xerkennung}$
 - Analogie zur Schriftsprache
 - entspricht dem subjektiven Eindruck: gesprochene Sprache = Folge von Wörtern = Folge von Lauten
 - "Perlenkette diskreter Elemente"
 - klingen in jedem Kontext gleich

Gesprochene Sprache

- Sprachverstehen ist nicht nur ein (passiver) Analyseprozeß
- aktive Rekonstruktion aus einem hochredundanten Code
 - Phonetik
 - Morphologie
 - Syntax
 - Semantik
 - Weltwissen
 - Domänenwissen

Gesprochene Sprache

- Modellerweiterungen sind nötig
 - Artikulation ist ein asynchroner Prozess → artikulatorische Varianz
 - Artikulation ist kontextuell beeinflusst → Koartikulation, Assimilation
 - suprasegmentale Eigenschaften (Prosodie) → Rhythmus, Betonung, Melodie
 - anatomische und psychische Individualität → Sprechervarianz
- Ökonomieprinzip: Sprecher versucht immer, sein Kommunikationsziel mit minimalem Aufwand zu erreichen
 - hohe Redundanz → geringe Qualität der Artikulation

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Spracherkennung als technisches Problem

- Repräsentationsformen für Sprache
 - analoges Signal
 - digitalisiertes Signal
 - (digitalisierte) parametrische Signalbeschreibung
 - lineare Symbolfolgen
 - phonetisch: Laute, Diakritika
 - graphematisch: Buchstaben, Interpunktion
 - textuell: Morphe, Wortformen, Sätze
 - strukturelle Beschreibungen (für Silben, Wörter, Sätze, Texte)
 - "logische" (semantische) Beschreibung
 - (Re-)aktionsklassen
 - Steuerimpulse
 - Datenbankanfragen
 - Dialogantworten
 - Übersetzungen

Spracherkennung als technisches Problem

- Spracherkennung (ASE, ASR)
 - analog → textuell
- Sprachverstehen (ASV, ASU)
 - analog → "logisch"
- Sprachdialog-, Sprachübersetzungs-, Sprachkommandosysteme
- Verarbeitung natürlicher Sprache (NLP)
 - textuell → "logisch"
 - textuell → strukturell
 - textuell → textuell
 - textuell → ???
- ASV = ASE + NLP ???

Spracherkennung als technisches Problem

- erste Wende: Sprachverstehen
 - Reaktion auf Schwierigkeiten
 - menschliches Vorbild
 - Voraussetzung: technische Systeme, die Sprache "verstehen" können
 - akustische Programmierung, z.B. Datenbankabfrage
- zweite Wende: zurück zur Spracherkennung
 - verbesserte Lösungen bei der Signalverarbeitung und Klassifikation
 - unüberschaubare Systeme
 - extrem hoher Erarbeitungsaufwand für hochgradig spezialisierte Lösungen

Spracherkennung als technisches Problem

- Sprachsignal enthält sehr viel Varianz
 - Sprecher
 - Kontext
 - Umgebung
 - . . .
- Spracherkennung ist Suche nach Invarianten
 - Gemeinsamkeiten von Lauten/Silben/Wörtern
 - Wie kann man die Varianz "herausfiltern"?
 - Spracherkennung = Dekodierung?
- das Sprachsignal ist ein unterbestimmter Kode
 - Verschleifungen, Weglassungen, ...
 - Hörer muss Information ergänzen
 - Spracherkennung ist auch ein aktiver Prozess der Informationsrekonstruktion

Spracherkennung als technisches Problem

Zielstellungen bei der Verarbeitung gesprochener Sprache

- AD-/DA-Wandlung (z.B. Telefon)
 - analog → digital
 - digital → analog
- Sprachkodierung, Sprachkompression, Sprachverschlüsselung
 - digital ↔ digital
- Sprach(voll)synthese
 - digital → analog
 - parametrisch → analog
 - phonetisch → analog
 - graphemisch → analog
 - "strukturell" → analog
- Sprecheridentifikation, -verifikation, -evaluation
- Sprachidentifikation

Spracherkennung als technisches Problem

- historischer Ausgangspunkt: Spracherkennung
 - Nachrichtentechnik
 - Kanalbandbreiten (Transatlantikkabel)
 - digitalisierte Sprache ≈ 100 Kbit/s
 - Kanalvocoder ≈ 10Kbit/s
 - Formantvocoder ≈ 1Kbit/s
 - Lautzeichenübertragung ≈ 0,1Kbit/s
 - Mensch-Mensch-Kommunikation
 - Vision: akustische Schreibmaschine
- erste Erfolge: Erkennen für isolierte Laute (Vokale), später auch für isoliert gesprochene Einzelworte
 - Kommandointerpreter
 - "akustische Tastatur"
 - Anwendungen in zahlreichen Gebieten

Spracherkennung als technisches Problem

- Symbiose 1: Sprachdialogsysteme
 - zielorientierter Dialog erfordert Sprachverstehen
 - Beschränkung auf spezielle Einsatzgebiete
- Symbiose 2: automatisches Dolmetschen
 - Übersetzen erfordert wenigstens partielles Verstehen
 - Übersetzen ist aber auch ohne detailliertes Spezialwissen möglich
- Langzeitperspektive: Integration von ASE und NLP

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Parameter und Einschränkungen 25

Parameter und Einschränkungen

- Beschränkungen des Nutzerkreises
 - Sprecherzahl:
ein / mehrere / viele Sprecher, bekannte / unbekannte Sprecher
 - Sprechertyp
weiblich/männlich, Kind / Erwachsener
individuelle Besonderheiten: Anatomie, Dialekt, Sprachfehler, ...
 - Sprecherdisziplin (teilweise sehr hohe Anforderungen)
Wortpausen: Einzelworte / fließende Sprache
Artikulation: Lesesprache / Diktiersprache / Spontansprache
Sprachumfang: Lexik / Syntax
 - Sprecherdisposition:
Stress / Ermüdung / Konzentration / Gesundheitszustand
 - Kooperativität
 - Vertrautheitsgrad

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Parameter und Einschränkungen 27

Parameter und Einschränkungen

- Beispiele für Wortschatzgrößen (Vollformen)
 - grunt detector: 1
 - ja/nein-Erkennen: 2
 - Ziffern/Zahlen: 10 + x
 - Kommandos: 20 - 200
 - Auskünfte: 500 - 2000
 - Alltagssprache: 8000 - 20000
 - Diktiermaschine: 20000 - 50000
 - Deutsch (ohne Fremdwörter) \approx 300000

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Parameter und Einschränkungen 29

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Anwendungsbereiche 31

Parameter und Einschränkungen

- akustische Aufnahmebedingungen:
 - Raum:
reflexionsfrei / Studio / Telefonzelle
→ lineare und nichtlineare Transformationen
 - Mikrofon:
Kehlkopfmikrofon / Kopfgeschirr / Handmikrofon / Telefon
→ Frequenzgang, Bandbreite
 - Störgeräusche:
Sprecherkabine / Büro / Fahrerkabine / Maschinenraum / Bahnhofshalle / Cockpit
→ Störabstand
- Nutzungsbedingungen: stationär / mobil

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Parameter und Einschränkungen 26

Parameter und Einschränkungen

- Anwendungsgebiete
 - Beispiele
Versandbestellung, home banking
Bahnauskunft, Flugreservierung
Terminabsprache
Patentrecherche, ärztliche Diagnose
Telefonseelsorge
 - Unterscheidungskriterien
Wortschatz / Grammatik
Semantik (atomar / kompositionell)

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Parameter und Einschränkungen 28

Parameter und Einschränkungen

- Dialoggestaltung
 - geführter Dialog / verteilte Initiative
- Systemmodifikation, -adaptation
 - Lernen / Nachführen / Neulernen / Umprogrammieren für
 - neue Sprecher / neue Wörter / neue Anwendungen
- Extrem viele Freiheitsgrade beim Systementwurf
 - Universelle Lösung des "Spracherkennungsproblems" ist nicht zu erwarten!
→ Spektrum speziell angepasster Systemvarianten

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Parameter und Einschränkungen 30

Anwendungsbereiche

Verglichen mit anderen Eingabekanälen ist Spracherkennung *immer* mit hoher Unsicherheit verbunden.

Wozu dann eigentlich?

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Anwendungsbereiche 32

Anwendungsbereiche

- Anwendungsdruck ist augenscheinlich sehr hoch:
 - natürlicher Kanal der Mensch-Mensch-Kommunikation
 - unterstützt kollektives Problemlösen
 - erfordert im Idealfall wenig Übung, von Natur aus mnemonisch (Klartext, keine Kürzel)
 - verhältnismäßig schneller Eingabekanal
 - Tastatureingabe: 10-20 ... 100-150 W/min (untrainiert/trainiert)
 - Handschrifteingabe: 25 W/min mit/ohne Übung
 - Sprechen 120-250 W/min mit/ohne Übung
 - Diktiermaschine 40 W/min
 - wichtigster Kanal in multimedialen Kommunikationssituationen

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Anwendungsbereiche 33

Anwendungsbereiche

- aber: Vorteile oft nur unter idealisierten Bedingungen
 - meist preiswerte technische Alternativen verfügbar
 - Tastatur
 - grafische Bedienoberflächen
 - direkte Datenerfassung
 - (idealisierter) Geschwindigkeitsvorteil oft nicht so entscheidend (z.B. Diktiergerät), wohl aber die schnelle Verfügbarkeit der eingegebenen Texte
 - Medienkonvergenz
 - Telefon wird zum Multimediaterminal
 - Telefonie über den Arbeitsplatzrechner
 - direkte Manipulation oft einfacher als die Formulierung sprachlicher Befehle (z.B. Operationsmikroskop)
 - Joystick, Maus, Touchscreen, Pedale, ...
 - leicht abhörbar

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Anwendungsbereiche 35

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Spracherkennung als akademisches Problem 37

Spracherkennung als akademisches Problem

- teilweise heftige Kontroverse
 - "Each time I fired a phonetician - recognition rate increased by 3%".
 - "With friends like statistics - who needs linguistics."
 - "Die KI in der Spracherkennung hat uns zehn Jahre gekostet."

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Spracherkennung als akademisches Problem 39

Anwendungsbereiche

- hoher Anwendungsdruck (Forts.)
 - alternative Interaktionskanäle möglicherweise blockiert
 - Diktieren am Operationsmikroskop
 - unkritische Bedienfunktionen im Auto
 - Cockpitassistent
 - Behinderungen
 - alternative Kanäle möglicherweise unzumutbar
 - naive Nutzer in öffentlichen Informationsdiensten aber problematisch: unkannte Sprecher, Sprecherdisziplin
 - ubiquitous / wearable computing
 - Bewegungsfreiheit
 - geringer Raumbedarf (nur Mikrofon)
 - lichtunabhängig
 - öffentlich, separat protokollierbar

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Anwendungsbereiche 34

Anwendungsbereiche

- Unsicherheit kann durch Redundanz kompensiert werden
 - Eingabewiederholung / Eingabebestätigung
 - erfordern aber Zeit und Geduld
- bisher realisierte Anwendungen
 - Maschinensteuerung (auch Software)
 - Auskunftssysteme
 - Diktiersysteme
- Prototyplösungen
 - Dolmetschen für spezielle Anwendungen
 - Multimediaretrieval
 - Gesprächsprotokollierung

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Anwendungsbereiche 36

Spracherkennung als akademisches Problem

- Ziel: tieferes Verständnis für humane Sprachperzeption
 - Validierung perzeptionspsychologischer und psycholinguistischer Theorien
 - Entwicklung von Problembewusstsein → Aufgabenstellungen für weitere psychologische Untersuchungen
- humane Spracherkennung als Vorbild
 - nicht unbedingt: technische Spracherkennung = humane Sprachperzeption "Flugzeuge schlagen auch nicht mit den Flügeln"
 - aber: Anregungen z.B. Nutzung gehörbezogener Parameter
 - Motor für die weitere Entwicklung der Forschung Aufzeigen der Lücke zwischen technischer Realität und humanem Vorbild

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Spracherkennung als akademisches Problem 38

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Herausforderungen 40

Herausforderungen

- Kontinuität
 - keine Diskontinuitäten im Signal (Laut, Silben, Wort, Phrasengrenzen)
- Variabilität
 - Anatomie / Dialekt / sprachlicher Kontext / Sprechtempo / Emotion / Aufnahmebedingungen
- Komplexität
 - 12 distinktive Merkmale
 - 40 - 50 Phoneme
 - 100 - 200 Allophone
 - 1000 - 2000 Diphone
 - 1000 - 2000 Halbsilben
 - ≈ 10000 Silben
 - 100000 Grundformen (Komposita?)
 - potenziell unendlich Sätze

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Herausforderungen 41

Herausforderungen

- lexikalische Bedeutung wird erst durch den Kontext endgültig determiniert
 - *Bienenhonig/Imkerhonig*
 - *Schweineschnitzel/Jägerschnitzel*
- Bedeutung ist nicht statisch und kann im Dialog ausgehandelt werden

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Herausforderungen 43

Chronik

- 1844 Telegraph
- 1858 transatlantischer Telegraph
- 1876 Telefon
- 1927 transatlantische Funkverbindung
- 1939 Kanalvocoder
- 1946 Klangspektrograph: visible speech
- 1948 akustische Theorie der Sprachproduktion
- 1951 Formantsynthese für Einzellaute
- 1956 transatlantisches Telefon
- 1958 kommerzielle Digitalrechner
- 1962 PCM, Satellitenkommunikation
- 1963 großer Optimismus
- Morris Halle: ein Problem - zwei Jungs - drei Jahre
→ Detektoren für zwölf Merkmale
- 1965 Fast Fourier Transformation (FFT)

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Chronik 45

Chronik

- 1989 Sprecherunabhängige kontinuierliche Spracherkennung mit 1000 Wörtern
- 1993 Diktiergerät für kontinuierliche Sprache mit 25000 Wörtern
- 1993 Kommandoerkennung in Apples System 7
- 1995 Sprecheradaption mit linearer Regression
- 1996 Erkennung von Spontansprache
- 1996 Sprecheradaption durch Vokaltraktnormalisierung
- 2000 Audio-visuelle Erkennung für großen Wortschatz
- 2000 Prototypen für das Maschinelle Dolmetschen
- 2000 XML-Standard für Dialogsysteme (Draft)
- 2003 Telefonesysteme im breiten Einsatz
- 2004 XML-Standard für Dialogsysteme (Recommendation)
- 2007 Spracherkennung in Windows Vista (einschließlich Diktat)

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Chronik 47

Herausforderungen

- Ambiguitäten auf verschiedenen Ebenen
 - Homophonie:
to/too, Rad/Rat, Beeren/Bären, ...
 - partielle Ähnlichkeiten (Überschneidungen):
Fahrt/fort
 - Wortgrenzen:
grey tape/great ape, Wach-traum/Wacht-raum, Drucker-zeugnis/Druck-erzeugnis
 - Unterordnung in der Satzstruktur:
Der Mann sah das Mädchen mit dem Fernglas.
 - Referenz in der logischen Struktur:
das Tonband, das Nixon vernichtete
 - phrasale Gliederung:
Der gute Mann denkt an sich [,] selbst zuletzt.
Der Professor [,] sagt [,] der Student sei unterqualifiziert.

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Herausforderungen 42

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Herausforderungen 44

Chronik

- 1966 digitale Filterung
- 1968 linear predictive coding (LPC)
- 1970 erste Arbeitsplatzrechner
- 1970 erstes DARPA-Projekt: Speech Understanding Research
- 1971 Worterkennung mit Schablonenvergleich (DTW)
- 1972 Sprecherverifikation
- 1973 Dennis Klatt: Hören oder Lesen
- 1975 Hidden-Markov-Modelle (HMM)
- 1976 Bruce Lowerre: HARPY (HMM mit 15000 Zuständen)
- 1976 Text-to-Speech-Synthese
- 1980 Mel-Cepstrum, Vektorquantisierung
- 1981 Signalprozessoren (DSP)
- 1985 kontextabhängige Phonmodelle
- 1985 Backpropagation für KNN

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Chronik 46

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

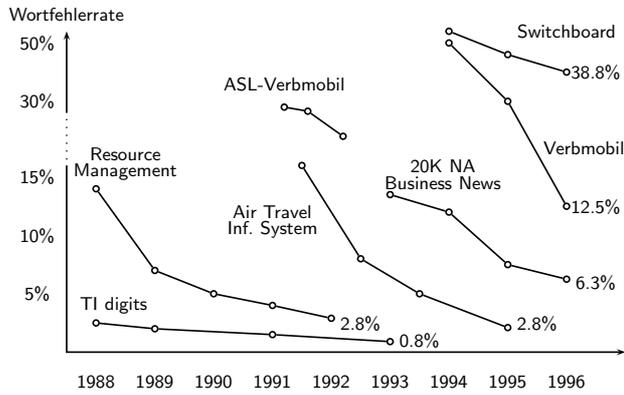
- Gesprochene Sprache
- Spracherkennung als technisches Problem
- Parameter und Einschränkungen
- Anwendungsbereiche
- Spracherkennung als akademisches Problem
- Herausforderungen
- Chronik
- Entwicklungsstand und Ausblick

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Chronik 48

Entwicklungsstand und Ausblick

- Aufgaben mit steigendem Schwierigkeitsgrad



Entwicklungsstand und Ausblick

- Steigender Bedarf an Trainingsdaten

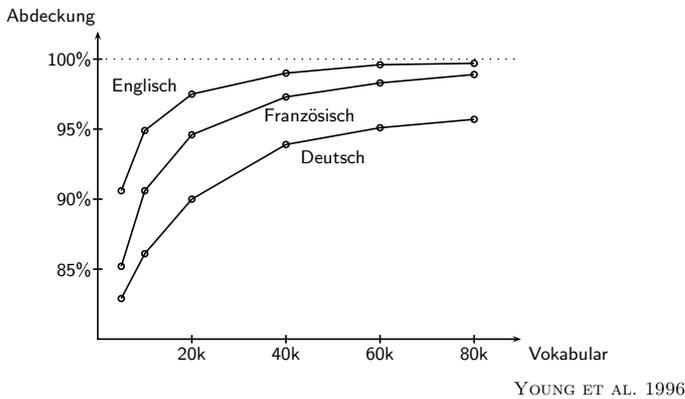
Spontansprache (LVCSR)

Zeit-raum	Korpus	Trainings- daten		Voka- bular Wort- formen	Per- plexi- tät	Wort- fehler- rate %
		h	Wort- formen			
93-95	Switchboard (SWB)	60	2.2M	10k	120	45
96-97	Switchboard (SWB)	120	3.1M	20k	80	30
97-	Switchboard-2 (SWB-2)	140	3.1M	20k	75	35
96-	Call Home English (CH Eng)	20	200k	25k	120	40
95-	Call Home Spanish (CH Span)	18	200k	23k	120	55
96-	Call Home Arabish (CH Arab)	18	300k	16k	-	60
95-	Call Home Mandarin (CH Mand)	16	160k	20k	175	55
96-	Call Home German (CH Germ)	16	170k	20k	120	60

YOUNG & CHASE 1998

Entwicklungsstand und Ausblick

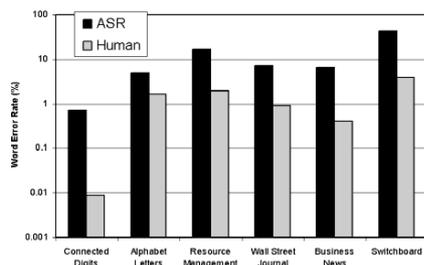
- Wie groß müssen die Wörterbücher sein?



YOUNG ET AL. 1996

Entwicklungsstand und Ausblick

- Wie gut ist die Erkennungssicherheit?



MOORE 2003

Entwicklungsstand und Ausblick

- Steigender Bedarf an Trainingsdaten

Gelesene Sprache (CSR)

Zeit- raum	Korpus	Trainings- daten		Voka- bular Wort- formen	Per- plexi- tät	Wort- fehler- rate %
		h	Wort- formen			
87-92	Ressource Management (RM)	4	-	1k	60	4
92-94	Wall Street Journal (WSJ)	12	38M	5k	50	5
93-94	Wall Street Journal (WSJ)	66	120M	20k	150	10
94-95	North Am. Business News (NAB)	66	400M	65k	150	7
95-	Broadcast News (BN)	100	130M	65k	200	20

YOUNG & CHASE 1998

Entwicklungsstand und Ausblick

- Wachstum des Wortschatzes

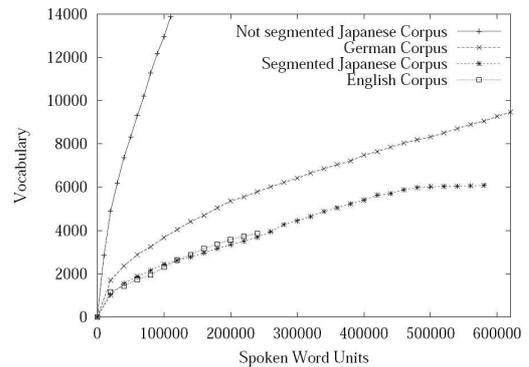


Figure 1. Vocabulary growth comparing German, English and Japanese

Entwicklungsstand und Ausblick

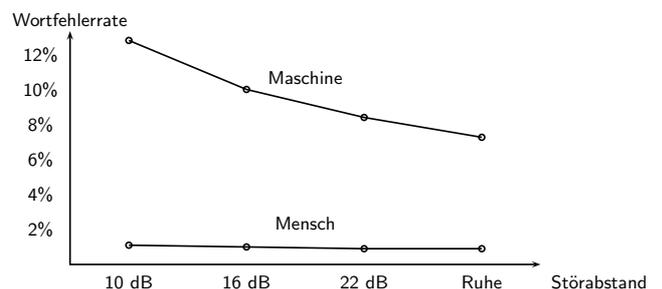
- Wie groß müssen die Wörterbücher sein?

	Englisch	Französisch	Deutsch
Datenquelle	Wall Street Journal	Le Monde	Frankfurter Rundschau
Korpusgröße (Wortformen)	37.2M	37.7M	31.5M
Anzahl unterschiedlicher Wortformen	165k	280k*)	500k*)
Bigram-Perplexität	198	178	430
Trigram-Perplexität	135	119	336
Mittl. Anz. Phone/Wortform	4.16	3.53	5.09
Einzelphon-Wortformen	3%	19%	0.5%

*) Unter Berücksichtigung der Groß-/Kleinschreibung!

Entwicklungsstand und Ausblick

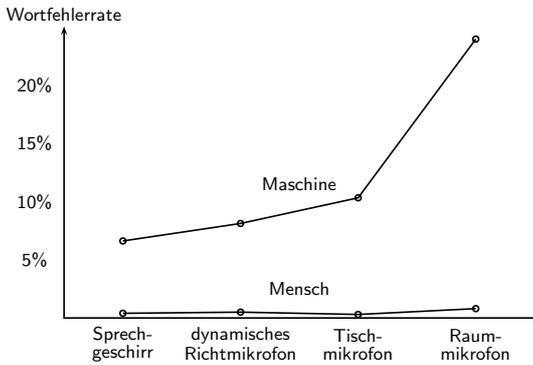
- Wie gut ist die Erkennungssicherheit?



LIPPMANN 1997

Entwicklungsstand und Ausblick

- Wie gut ist die Erkennungssicherheit?



LIPPMANN 1997

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Entwicklungsstand und Ausblick 57

Grundlagen der Sprachsignalerkennung

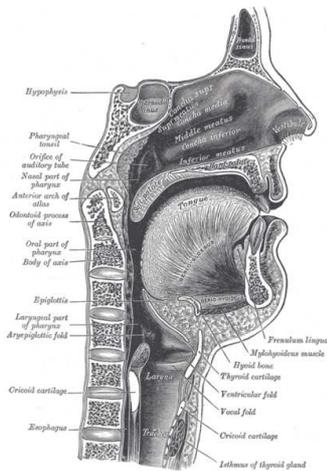
- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- Worterkennung
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Entwicklungsstand und Ausblick 59

Sprachsignalerzeugung

- Artikulationsorgane
 - Lunge: Druckaufbau Energiezufuhr
 - Stimmklappen: Anregung
 - Vokaltrakt: Filterung

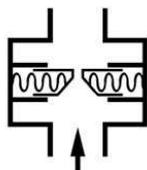


Signalbeschreibungen

Sprachsignalerzeugung 61

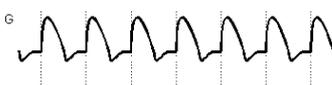
Sprachsignalerzeugung

- stimmhafte Anregung
 - Polsterpfeife



FELBAUM (1984)

- Dreiecksfunktion



HESS (1983)

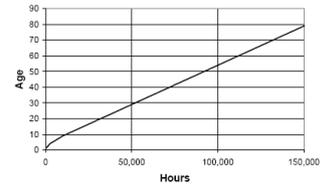
- stimmlose Anregung: rauschförmiges Anregungssignal (Engstelle)
- "gemischte" Anregung

Signalbeschreibungen

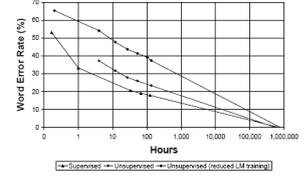
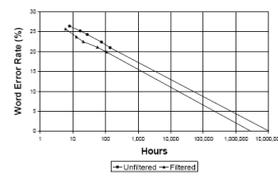
Sprachsignalerzeugung 63

Entwicklungsstand und Ausblick

- Wieviele Daten brauchen wir eigentlich? (MOORE 2003)



Geschätzte Gesprächsdauer, der ein Mensch ausgesetzt ist



Extrapolierte Wortfehlerraten für wachsende Größe der Trainingskorpora

Spracherkennung als technisches und akademisches Problem

Entwicklungsstand und Ausblick 58

Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung

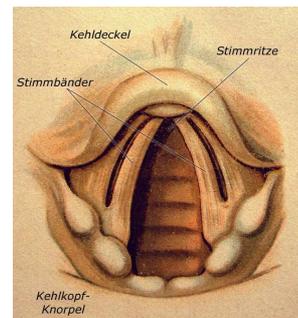
- Sprachsignalerzeugung
- Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie
- Physik des Sprachsignals
- Modellierung der Sprachsignalerzeugung
- Sprachperzeption

Signalbeschreibungen

60

Sprachsignalerzeugung

- Anregung
 - Stimmklappen

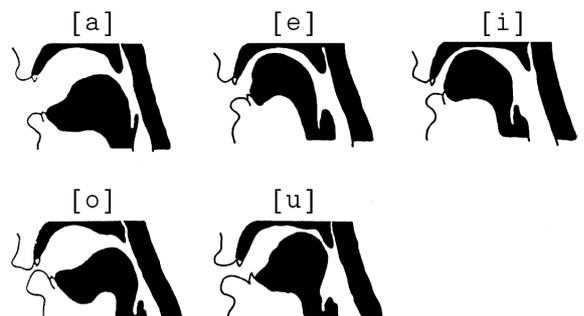


Signalbeschreibungen

Sprachsignalerzeugung 62

Sprachsignalerzeugung

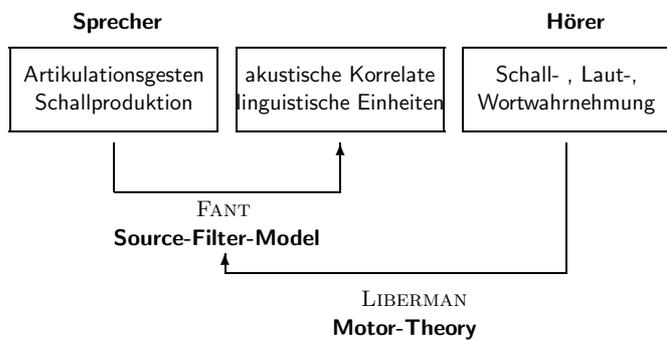
- Vokaltrakt (Resonanzkörper)



FELBAUM (1984)

Signalbeschreibungen

Sprachsignalerzeugung 64



- Sprachsignalerzeugung
- Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie
- Physik des Sprachsignals
- Modellierung der Sprachsignalerzeugung
- Sprachperzeption

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie

- akustische Phonetik
 - Beschreibung der Laute nach dem subjektiven Höreindruck
- physikalische Phonetik
 - Untersuchung des Sprachsignals mit physikalischen Methoden
- artikulatorische Phonetik
 - Beobachtung der Artikulationsbewegungen
 - Röntgenaufnahmen des Mundraumes
- Phonologie
 - Klassifikation der Laute nach ihrer Funktion im Sprachsystem (Bedeutungsdifferenzierung)

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie

- artikulatorische Phonetik: Klassifizierungsprinzipien
 - Artikulationsart
 - Artikulationsort
 - Verschlusslaute/stationäre Laute
 - Konsonanten/Vokale
 - Anregung (stimmhaft/stimmlos)

Laute und Lautklassen

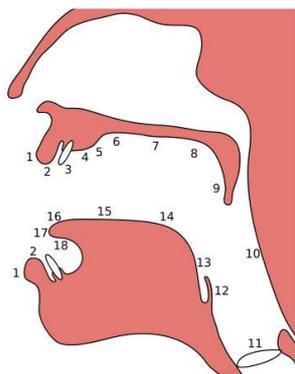
- Klassifizierung der Konsonanten nach der Artikulationsart
 - Verschlusslaute (Plosive)
 - Druckaufbau (Verschlußphase)
 - Verschlusslösung (Explosivphase, "Burst")
 - stimmhaft ([b], [d], [g]), stimmlos ([p], [t], [k])
 - Reibelaute (Frikative, Spiranten)
 - Engebildung im Mund- oder Rachenraum
 - rauschartiger Laut
 - stimmhaft ([v], [z], [ʃ]), stimmlos ([f], [s], [ʃ])
 - Nasale
 - Mundhöhle weitgehend verschlossen, Luft entweicht durch die Nase
 - immer stimmhaft ([m], [n], [ŋ])

Laute und Lautklassen

- Klassifizierung der Konsonanten nach der Artikulationsart
 - Seitenlaute (Laterale)
 - Luftstrom führt rechts und links an der Zunge vorbei
 - immer stimmhaft ([l])
 - Intermittierende (Vibranten)
 - Zäpfchen oder Zunge schwingen vom Luftstrom angeregt
 - immer stimmhaft ([r], [R])

Laute und Lautklassen

- Klassifizierung der Konsonanten nach dem Artikulationsort



- 2+2 Lippen: bilabial ([p], [b])
- 2+3 Lippen + Zähne: labiodental ([f])
- 16+3 Zunge + Zähne: dental ([s])
- 16+4 Zunge + Zahnfächer: alveolar ([d], [t])
- 15+7 Zunge + harter Gaumen: palatal ([ç])
- 14+8 Zunge + weicher Gaumen: velar ([k])
- 14+9 Zunge + Zäpfchen: uvular ([R])
- 11 Stimmritze: glottal ([h])

Laute und Lautklassen

- Überblick: Konsonanten

Art/Ort	lab.	alv.	p-alv.	pal.	vel.	uvul.	glot.
Plos:	p b	t d			k g		ʔ
Affrik:	pf	ts	tʃ				
Frik:	f v	s z	ʃ ʒ	ç	x	ʁ	h ɦ
Son:	m	n				ŋ	
Approx:		l		j			

BARRY 2003

Laute und Lautklassen

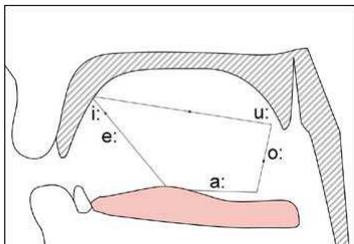
- Klassifizierung der Vokale nach der Artikulationsart
 - offen: [a:]
 - geschlossen: [u:]
 - gerundet: [o:]
 - nicht gerundet: [e:]

Signalbeschreibungen

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie 73

Laute und Lautklassen

- Sonderformen
 - Diphthonge (Gleitlaute) ([au], [ae], [ou])
 - nasalierte Vokale ([ẽ])
- Vokalviereck



Signalbeschreibungen

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie 75

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie

- Allophone
 - unterschiedliche lautliche Realisierungen für ein Phonem
 - freie Allophone (kontextunabhängig) [r] ↔ [R]
 - stellungsbedingte Allophone (kontextabhängig) [iç] ↔ [ax] (auch: [h])
 - teilweise sehr viele Allophone
z.B. ca. 100 [k] -Allophone
Kiste, Kasten, Keller, Kohle, kühl, klein, wacker, ...

Signalbeschreibungen

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie 77

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie

- (Sprech-)Silbe
 - artikulatorische Einheit
 - alternative Gliederung zur Morphemzerlegung
 - Silbengliederung
 - Silbe → Onset Rhyme
 - Rhyme → Peak Coda
 - Silbenmodelle
 - CV ([da:])
 - CVC ([ta:k])
 - VCC ([ast])
 - Halbsilben (Onset + Peak, Peak + Coda)

Signalbeschreibungen

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie 79

Laute und Lautklassen

- Klassifizierung der Vokale nach dem Artikulationsort (Zungenwölbung)
 - Horizontalposition für den höchsten Punkt des Zungenrückens
 - Vorderzungenvokale, palatale Vokale in der Nähe der Zähne helle Vokale ([i:])
 - Hinterzungenvokale, alveolare Vokale in der Nähe des Zäpfchens dunkle Vokale ([u:])
 - Vertikalposition des Zungenrückens
 - hoch ([i:])
 - tief ([a:])

Signalbeschreibungen

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie 74

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie

- Laut / Phon
 - kleinste akustisch/artikulatorisch wahrnehmbare Einheit
 - Schreibweise: eckige Klammern
 - elementare Lautverbindungen: Diphone (Triphone, ...)
- Phonem
 - kleinste bedeutungsdifferenzierende Einheit
 - am Sprachsystem orientiert, nicht am Signal!
 - Schreibweise: Schrägstriche
 - Minimalpaare (/ta:k/, /la:k/): morphemdifferenzierend

Signalbeschreibungen

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie 76

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie

- Morph
 - kleinste bedeutungstragende lautliche Einheit
 - am Sprachsystem orientiert!
- Morphem
 - ein oder mehrere bedeutungsgleiche Morphe, die sich in der gleichen lautlichen Umgebung gegenseitig ausschließen (Allomorphe)
- Allomorph
 - stellungsbedingte: arbeit-et / schläf-t
 - freie: Wandr-er / Wander-er

Signalbeschreibungen

Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie 78

Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung

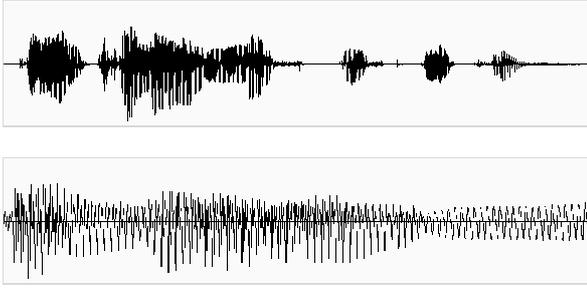
- Sprachsignalerzeugung
- Grundbegriffe aus Phonetik und Phonologie
- Physik des Sprachsignals
- Modellierung der Sprachsignalerzeugung
- Sprachperzeption

Signalbeschreibungen

Physik des Sprachsignals 80

Physik des Sprachsignals

- Schalldruckzeitfunktion $p(t)$



Physik des Sprachsignals

- Schalleistungspegel (energiebezogen)
 - Energie

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

- Pegel

$$L = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad (\text{in dB})$$

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (\text{Hörschwelle bei 1 kHz})$$

- Schallintensitätspegel (Leistung pro Flächeneinheit)

Physik des Sprachsignals

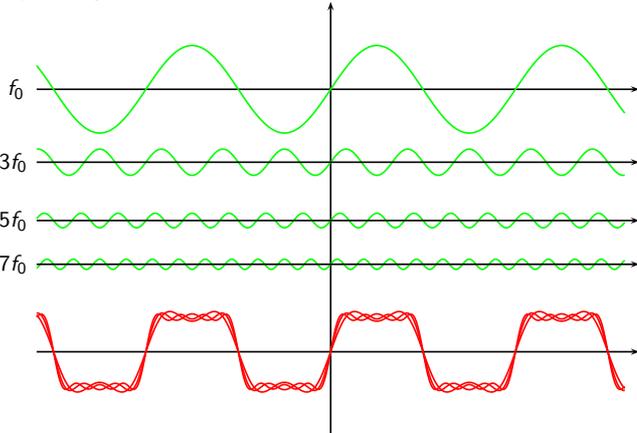
- Beschreibung der Frequenzcharakteristik (Spektrum)
- Sprachsignal kann dargestellt werden als Überlagerung sehr vieler reiner Sinusschwingungen

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

A maximale Amplitude
 $\omega = 2\pi f$ Kreisfrequenz
 φ Phasenverschiebung

Physik des Sprachsignals

- Spektralsynthese: Rechteckfunktion



Physik des Sprachsignals

- Schwankungen von 20 μPa bis 60 Pa
- Schalldruckpegel

$$L = 20 \lg \frac{\bar{p}}{p_0} \quad (\text{in dB})$$

$$\bar{p} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |p(t)| dt$$

$$p_0 = 20 \mu\text{Pa} \quad (\text{Hörschwelle bei 1 kHz})$$

Physik des Sprachsignals

- Sprachsignal ist nichtstationär
 - (quasi-) periodische und nichtperiodische Abschnitte (stimmhaft/stimmlos)
 - periodisch:

$$\forall t : x(t) = x(t + T)$$

T Periode
 $f_0 = \frac{1}{T}$ Grundfrequenz

Physik des Sprachsignals

- Spektrum: Summierung über viele Sinusschwingungen

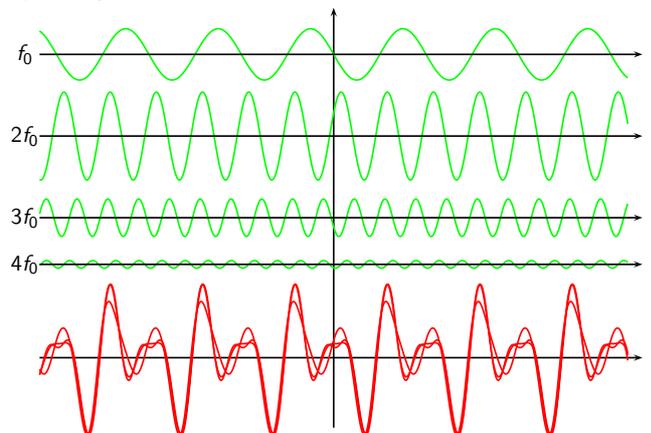
$$x(t) = \int_0^{\infty} A(\omega) \sin(\omega t + \phi(\omega)) d\omega$$

$A(\omega)$ Amplitudenspektrum
 $\phi(\omega)$ Phasenspektrum

- Phasenspektrum wird meist vernachlässigt
- Frequenzumfang der Sprache: 60 Hz bis 10 kHz

Physik des Sprachsignals

- Spektralsynthese: vokalischer Laut



Modellierung der Sprachsignalerzeugung

- Filtertypen
 - Tiefpass
 - Hochpass
 - Bandpass
- Verwendung zur Modellierung von Vokaltrakt und Abstrahlungscharakteristik

Signalbeschreibungen

Modellierung der Sprachsignalerzeugung 97

Modellierung der Sprachsignalerzeugung

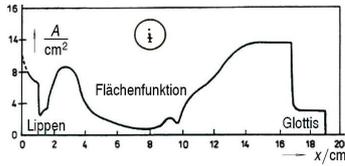
- zu modellierende Phänomene
 - Anregung (Laryngalsignal)
 - Form des Vokaltraktes als Funktion der Zeit
 - Verluste an den Vokaltraktwänden (Wärmeleitung, Flüssigkeitsverformung, Reibung)
 - Elastizität der Wände
 - Abstrahlung von den Lippen
 - Berücksichtigung des Nasenraums
- Vereinfachungen erforderlich

Signalbeschreibungen

Modellierung der Sprachsignalerzeugung 99

Modellierung der Sprachsignalerzeugung

- Filterwirkung des Vokaltrakts bestimmt durch seine Flächenfunktion (ortsabhängige Querschnittsfläche)



nach FANT (1960)

- Resonanzen des Vokaltrakts entsprechen den Formanten im Signalspektrum

Signalbeschreibungen

Modellierung der Sprachsignalerzeugung 101

Modellierung der Sprachsignalerzeugung

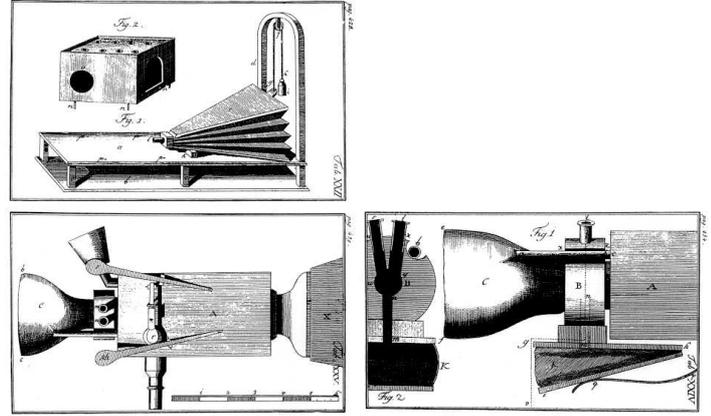
- UNGEHEUER (1962): Querschnittform ist akustisch irrelevant
- Approximation durch Röhrenmodell
 - kreisrunder Querschnitt
 - diskrete Längsschnittsfunktion (Treppenfunktion)
 - (meist) gleiche Länge der Teilabschnitte
 - Durchmesser ist klein im Vergleich zur Schallwellenlänge
 - Wand ist schallhart (keine Verluste)

Signalbeschreibungen

Modellierung der Sprachsignalerzeugung 103

Modellierung der Sprachsignalerzeugung

- WOLFGANG VON KEMPELEN (1791)



Signalbeschreibungen

Modellierung der Sprachsignalerzeugung 98

Modellierung der Sprachsignalerzeugung

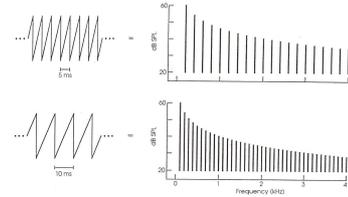
- Source-Filter-Modell (GUNNAR FANT 1960)

$$x(t) = r(t) \otimes v(t) \otimes a(t)$$

- $r(t)$ Abstrahlung von den Lippen (Hochpass)
- $v(t)$ Vokaltraktform (Resonator, Bandpass)
- $a(t)$ Anregungsfunktion (Folge von Dreiecksimpulsen bzw. weißes Rauschen)

Abstrahlung wird meist mit in die Vokaltraktcharakteristik eingerechnet

- Anregung für Vokale ist in erster Näherung Dreiecksfunktion

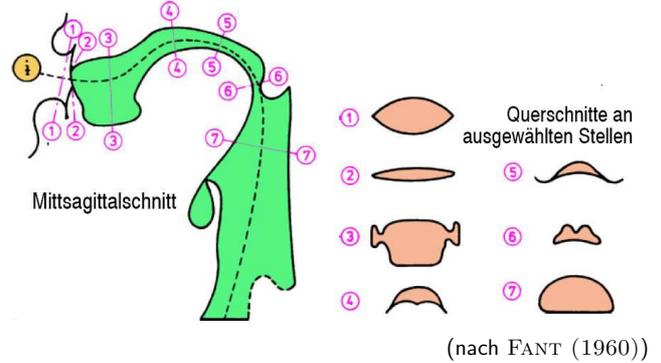


Signalbeschreibungen

Modellierung der Sprachsignalerzeugung 100

Modellierung der Sprachsignalerzeugung

- Vokaltraktquerschnitte



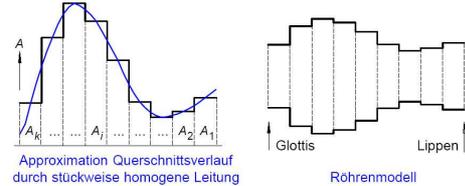
(nach FANT (1960))

Signalbeschreibungen

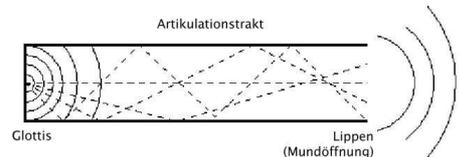
Modellierung der Sprachsignalerzeugung 102

Modellierung der Sprachsignalerzeugung

- Röhrenmodell des Vokaltrakts



HESS (1983)



HESS (1983)

Signalbeschreibungen

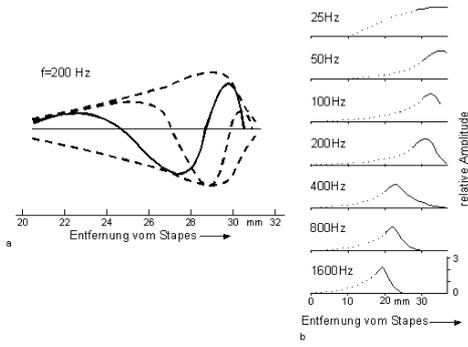
Modellierung der Sprachsignalerzeugung 104

Signalbeschreibungen

Modellierung der Sprachsignalerzeugung 104

Sprachperzeption

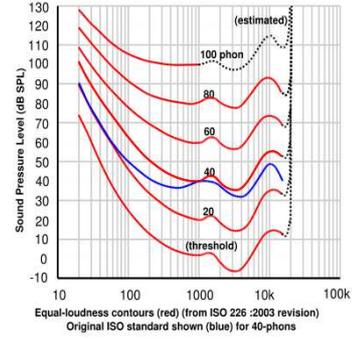
- Frequenz-Orts-Kodierung über Wanderwellen



FELLBAUM (1984) nach BEKESY (1960)

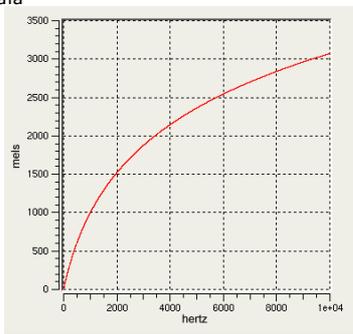
Sprachperzeption

- das Ohr ist kein idealer Sensor
- Lautstärkeempfindung (in phon) ist nicht proportional zum Schallpegel (in dB)
- Lautstärkeempfindung hängt von der Frequenz ab



Sprachperzeption

- nichtlineare Transformation von Information:
 - Tonhöhenempfindung ist nicht proportional zur Tonhöhe
 - mel-Skala



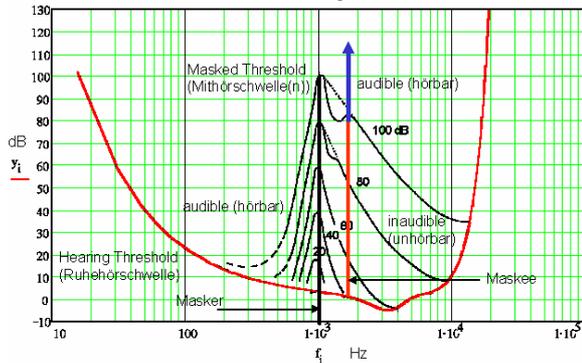
- Nachweis trotz Harmonieempfinden: Schmalbandrauschen, Sinustöne, keine Obertöne

Sprachperzeption

- Aggregation von Information
 - integrierte Wahrnehmung von Frequenzbändern (Frequenzgruppen)
 - 24 Frequenzgruppen füllen das Spektrum lückenlos aus
 - Frequenzgruppenbreite wächst mit steigender Frequenz
 - Frequenzgruppenbreite (in mel) ist über das gesamte Frequenzband konstant!
 - Frequenzgruppen können um jede beliebige Mittenfrequenz gebildet werden

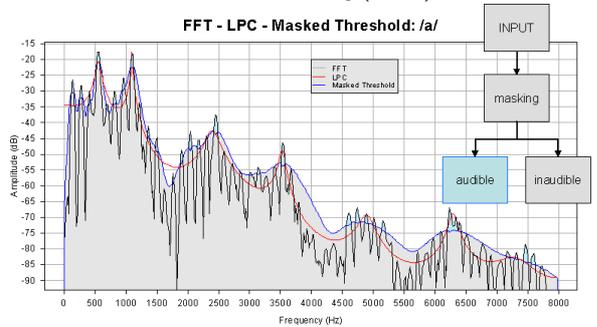
Sprachperzeption

- Verlust von Information: Maskierung



Human speech perception

- Verlust von Information: Maskierung (Forts.)

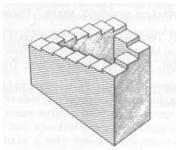


- Hinzufügen von Information: Residualtoneempfindung (Glocken, weibliche Stimme)

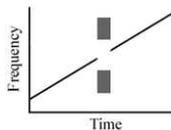
Sprachperzeption

- akustische Illusionen

- Shepard-Töne:



- Kontinuitätsillusion:

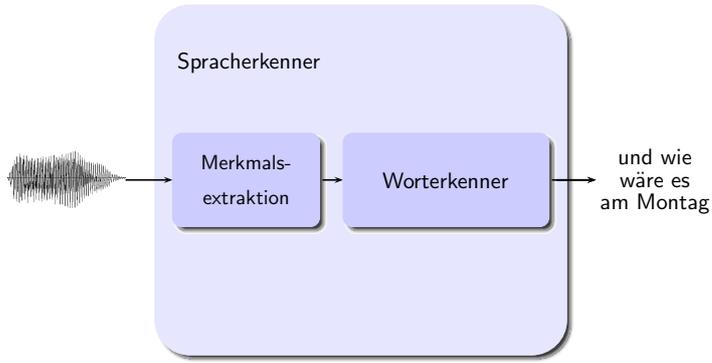


- Segmentillusion: gesprochene Sprache wird als Sequenz von isolierten Stimuli wahrgenommen (Perlenkette)
- frühe Idee: segmentiere das Signal und klassifiziere die Segmente in Phone bzw. artikulatorische Merkmale

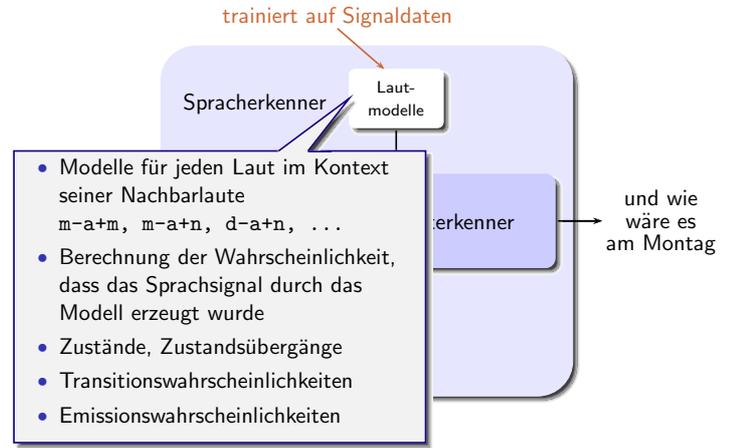
Grundlagen der Sprachsignalerkennung

- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- Worterkennung
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

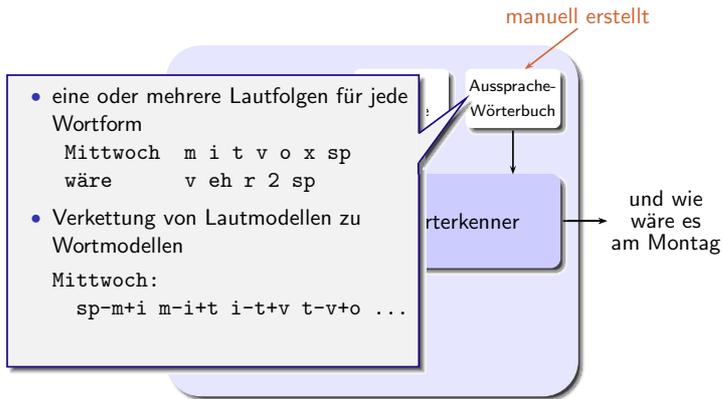
Überblick Spracherkennung



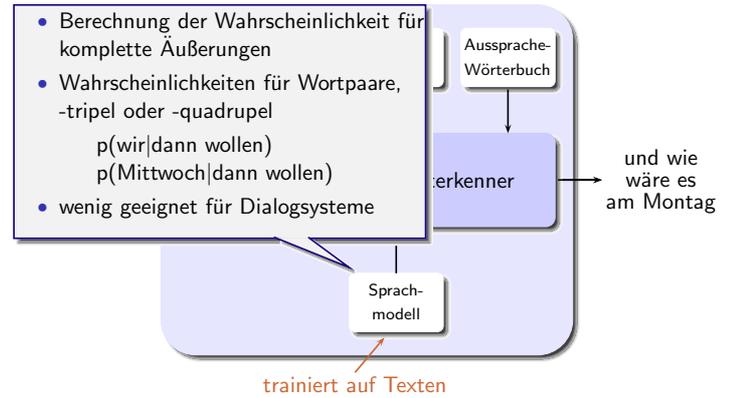
Überblick Spracherkennung



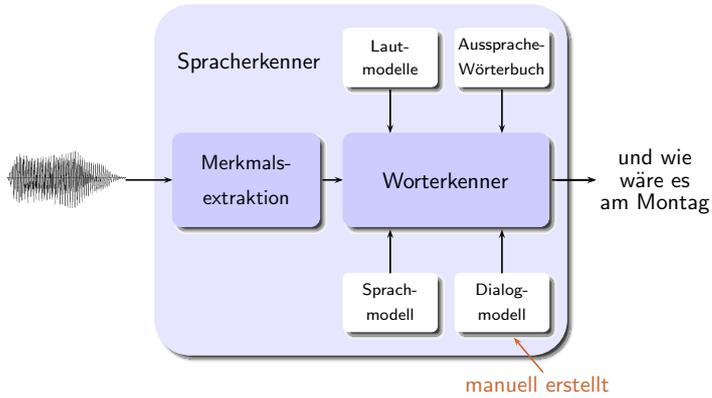
Überblick Spracherkennung



Überblick Spracherkennung



Überblick Spracherkennung



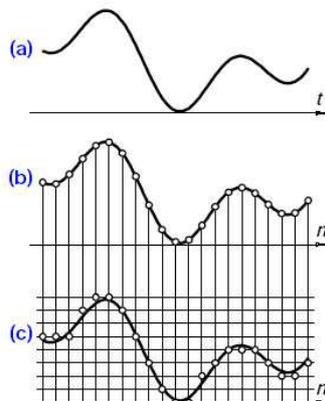
Merkmalsextraktion

- Signalwandlung
- Beschreibung im Zeitbereich
- Beschreibung im Frequenzbereich
- Cepstral-Analyse
- Linear Predictive Coding: LPC-Analyse
- Psychoakustisch inspirierte Techniken
- Gradientenmodellierung

Signalwandlung

- Mikrophon: Schalldruck \rightarrow elektrische Spannung
- Funktionsprinzip
 - Kohlemikrophon (Telefon)
 - elektrodynamisches Mikrophon
 - elektrostatisches Mikrophon
- Übertragungsfaktor (Empfindlichkeit)
- Frequenzgang
- Linearität
- Richtcharakteristik
- stationär/mobil

Digitalisierung



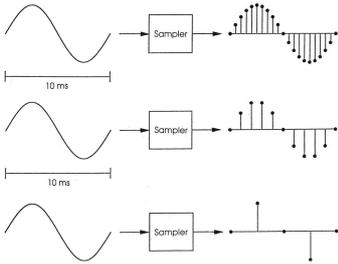
- Abtastung
- Quantisierung
- Kodierung

Abtastung

- Diskretisierung entlang der Zeitachse (Sampling)
Multiplikation mit einer Folge von Nadelimpulsen



- Abtastrate



Merkmalsextraktion

Signalwandlung 125

Abtastung

- typische Samplingraten
 - Telefon: 8 KHz
 - sonst: 16 ... 20 KHz

Merkmalsextraktion

Signalwandlung 127

Quantisierung

- Quantisierungsfehler
- Qualitätsmaß: Störabstand SNR (signal-to-noise ratio)
 - stationäres weißes Rauschen
 - Fehler ist unabhängig vom Inputsignal
 - Gleichverteilung für die Fehlerwahrscheinlichkeit in allen Quantisierungsintervallen

$$SNR = \frac{\sum_i x_i^2}{\sum_i (\hat{x}_i - x_i)^2}$$

x_i gemessener Inputwert
 \hat{x}_i quantisierter Inputwert

- typische Amplitudenauflösung: 6 ... 7 bit

Merkmalsextraktion

Signalwandlung 129

Signalbeschreibung im Zeitbereich

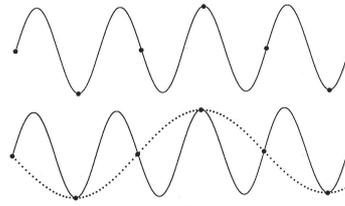
- Dilemma:
 - Sprache ist ein hochdynamischer Prozess
 - alle technischen Meßverfahren machen eine Annahme über die Stationarität
- Kurzzeitanalyse (Zeitfenster)
 - viele temporale Parameter können in kurzen Signalabschnitten (10 ... 30 ms) als konstant betrachtet werden
- Wahl der Fensterbreite
 - kurz: schlechte Glättung
 - lang: schlechte Reaktion auf plötzliche Änderungen im Signal

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Zeitbereich 131

Abtastung

- Aliasingbildung



- Abtasttheorem für bandbreitenbegrenzte Signale (SHANNON UND WEAVER 1949)

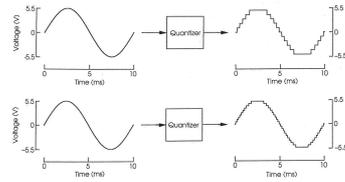
$$S = \frac{1}{T} = 2f_{max}$$

Merkmalsextraktion

Signalwandlung 126

Quantisierung

- Diskretisierung entlang der Amplitudenachse



- linear / logarithmisch

Merkmalsextraktion

Signalwandlung 128

Merkmalsextraktion

- Signalerfassung
- Beschreibung im Zeitbereich
- Beschreibung im Frequenzbereich
- Cepstral-Analyse
- Linear Predictive Coding: LPC-Analyse
- Psychoakustisch inspirierte Techniken
- Gradientenmodellierung

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Zeitbereich 130

Signalbeschreibung im Zeitbereich

- Energie

$$E(n) = \sum_{m=0}^M x(n-m)^2 \quad M: \text{Fensterbreite}$$

- stimmhaft: hohe Energie
- stimmlos: niedrige Energie

- Nulldurchgangsdichte

$$Z(n) = \sum_{m=0}^M |\text{signum}(x(n-m)) - \text{signum}(x(n-m-1))|$$

- stimmhaft: niedrige Nulldurchgangsdichte
- stimmlos: hohe Nulldurchgangsdichte
- simples Maß, für einfache Worterkenner bereits geeignet

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Zeitbereich 132

Signalbeschreibung im Zeitbereich

- Autokorrelation
 - für deterministische diskrete Signale

$$\phi(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) x(m+k)$$

- für zufällige und periodische Signale

$$\phi(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{m=-N}^N x(m) x(m+k)$$

- Kurzzeitautokorrelation

$$R(n, k) = \sum_{m=0}^M x(n-m) x(n-m-k)$$

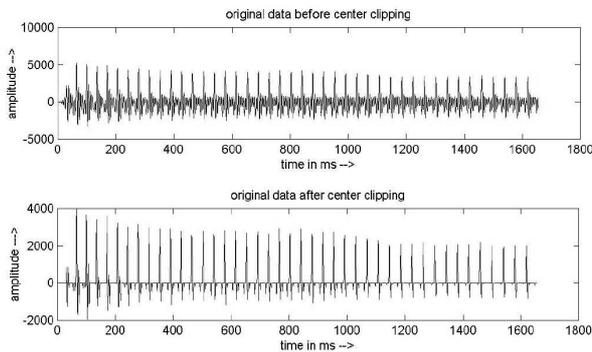
- die Autokorrelationsfunktion eines periodischen Signals ist ebenfalls periodisch und besitzt die gleiche Periode

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Zeitbereich 133

Signalbeschreibung im Zeitbereich

- höhere Detektionsschärfe durch Center Clipping



KAVITA (1999)

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Zeitbereich 135

Merkmalsextraktion

- Signalerfassung
- Beschreibung im Zeitbereich
- Beschreibung im Frequenzbereich
- Cepstral-Analyse
- Linear Predictive Coding: LPC-Analyse
- Psychoakustisch inspirierte Techniken
- Gradientenmodellierung

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 137

z-Transformation

- Transformation

$$X(z) = \mathcal{Z}(x(n)) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) z^{-n}$$

z komplexe Variable
 $X(z)$ komplexe Funktion

- konvergiert nur, wenn $\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)| |z^{-n}| < \infty$
- Konvergenzbedingung hat immer die Form: $R_1 < |z| < R_2$
- Rücktransformation

$$x(n) = \mathcal{Z}^{-1}(X(z)) = \frac{1}{j2\pi} \oint_C X(z) z^{n-1} dz$$

Kontur C im Konvergenzgebiet von $X(z)$ (Einheitskreis)

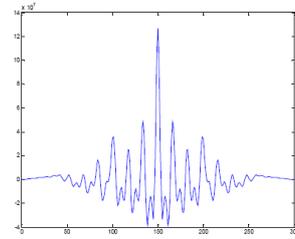
- z-Transformierte ist eine komplexe Funktion in einer komplexen Ebene

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 139

Signalbeschreibung im Zeitbereich

- Nachweis der Periodizität durch Autokorrelation



ein Frame des Vokals /i/ in six

BEAUCHAINE (2003)

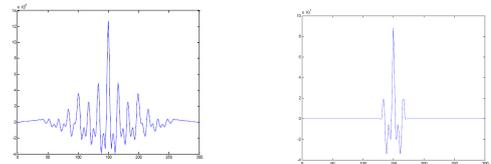
→ stimmhaft/stimmlos-Detektor

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Zeitbereich 134

Signalbeschreibung im Zeitbereich

- Autokorrelation nach center clipping



Merkmalsextraktion

Beschreibung im Zeitbereich 136

Signalbeschreibung im Frequenzbereich

- Transformationen für kontinuierliche und diskrete Zeitfunktionen

	kontinuierlich	diskret
beliebige Funktionen	Laplace-Transform.	z-Transformation
zeitbegrenzte oder periodische Funkt.	Fourier-Transform.	diskrete Fourier-Transform.

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 137

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 138

z-Transformation

- Spezialfall: Nadelimpuls

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(n) z^{-n} = 1$$

- Impulsantwort eines linearen Systems enthält die vollständige Information über seinen Frequenzgang

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 139

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 140

Diskrete Fourier-Transformation

- Spezialfall der z-Transformation für $z = e^{j\omega}$
- komplexe Funktion über dem Einheitskreis in einer komplexen Ebene
- Transformation

$$X(e^{j\omega}) = \mathcal{F}(x(n)) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j\omega n}$$

- Rücktransformation

$$x(n) = \mathcal{F}^{-1}(X(e^{j\omega})) = \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$

- ω ist Winkel zur reellen Achse
- Konvergenzbereich: $\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)| < \infty$
- Spektrum $X(e^{j\omega})$ ist eine periodische Funktion von ω
 - Periode 2π
 - Nachweis durch Ersetzen von ω durch $\omega + 2\pi$

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 141

Kurzzeitanalyse

- zeitabhängige Fourier-Transformation
 - Bewegungen des Zeitfensters über die Zeitachse
 - Multiplikation des Eingangssignals mit der Fensterfunktion $w(m)$
 - Frequenzcharakteristik des Zeitfensters geht mit in das Transformationsergebnis ein
 - unerwünschte "Filterung" des Sprachsignals

$$X(n, e^{j\omega}) = \mathcal{WF}(x(n)) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(n-m) x(m) e^{-j\omega m}$$

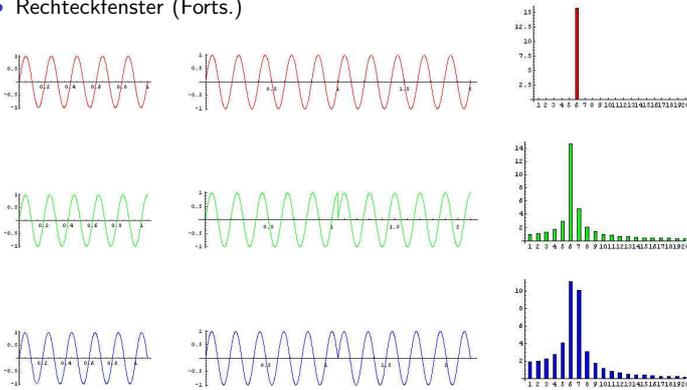
$$x(n) = \mathcal{WF}^{-1}(n, X(e^{j\omega})) = \frac{1}{2\pi w(0)} \int_{-\pi}^{\pi} X(n, e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 143

Kurzzeitanalyse

- Rechteckfenster (Forts.)



Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 145

Kurzzeitanalyse

- Unschärferelation
 - die Breite des Zeit- und des Frequenzfensters verhalten sich indirekt proportional zueinander

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t}$$

- gute Zeitauflösung \rightsquigarrow schlechte Frequenzauflösung
- gute Frequenzauflösung \rightsquigarrow schlechte Zeitauflösung

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 147

Kurzzeitanalyse

- z- und Fourier-Transformation sind nur für unendliche Zeitfunktionen definiert auch negative Zeiten!
 - Spektralanalyse über ganze Äußerungen ?
 - nur für stationäre Signalabschnitte sinnvoll sonst werden alle temporären Vorgänge "herausgemittelt"
 - Sprache ist ein dynamischer Prozeß
 - Ziel: spektrale Charakterisierung relativ kurzer Signalabschnitte

- Analysezeitfenster

$$w(n) \begin{cases} > 0 & n_0 \leq n < n_0 + N \\ = 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

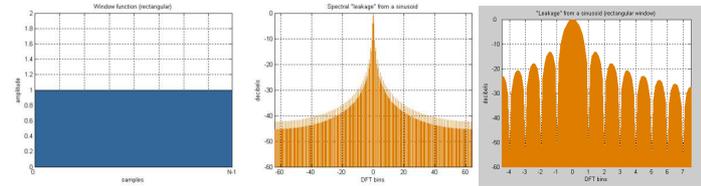
- typische Fensterbreiten: 10 ... 20 ms (überlappend)

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 142

Kurzzeitanalyse

- Fenster sind nichtlineare zeitliche Filter
 - Einfluss auf das Spektrum ist ebenfalls nichtlinear
 - leakage: Signalenergie wird auf andere Frequenzen verteilt
 - zwei Sinusschwingungen können ununterscheidbar werden
 - Fensterform kann die Wirkung abschwächen aber nicht vermeiden
- maximale Signaldeformation: Rechteckfenster

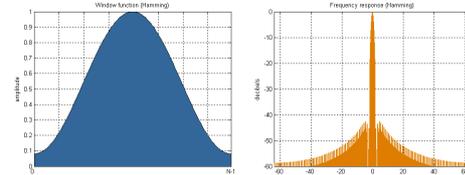


Merkmalsextraktion

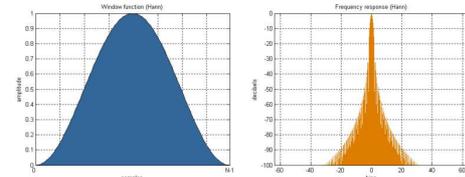
Beschreibung im Frequenzbereich 144

Kurzzeitanalyse

- Hamming-Fenster



- von Hann -Fenster ("Hanning")



Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 146

Diskrete Kurzzeit-Fourier-Transformation

- Annahme: Inputsignal ist periodische Fortsetzung des Fensterausschnittes

$$x(n) = x(n + N)$$

- Transformation

$$X(k) = \mathcal{KF}(x(n)) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

$$0 \leq k < N$$

- Rücktransformation

$$x(n) = \mathcal{KF}^{-1}(X(k)) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

$$0 \leq n < N$$

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 147

Merkmalsextraktion

Beschreibung im Frequenzbereich 148

Diskrete Kurzzeit-Fourier-Transformation

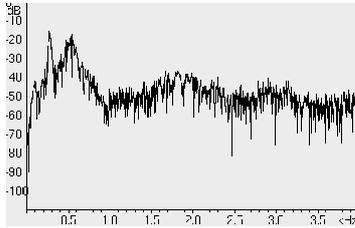
- Fast-Fourier-Transformation (FFT)
 - effiziente rechentechnische Realisierung der diskreten Kurzzeit-Fourier-Transformation
- Simulation von Bandpaß-Filterbänken durch FFT
 - typische Anzahl von Filtern: 20 ... 24

Cepstral-Analyse (Homomorphe Analyse)

- Sprachproduktion ist Faltung von Anregung und Impulsantwort des Vokaltraktes

$$x(n) = a(n) \otimes v(n)$$

- daher besitzt Spektrum für stimmhafte Abschnitte noch spektrale Feinstruktur



- Spektrale Hülle: Filtercharakteristik des Vokaltraktes
- Feinstruktur: Anregungscharakteristik

Cepstral-Analyse

- Idee: Falten ist Multiplikation im Frequenzbereich

$$X(k) = A(k) V(k)$$

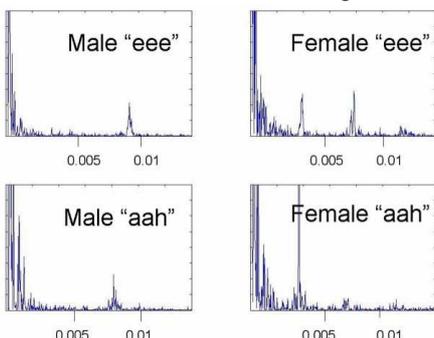
- Logarithmus eines Produktes ist die Summe der Logarithmen der Faktoren

$$\begin{aligned} \hat{X}(k) &= \log(X(k)) \\ &= \log(A(k) V(k)) \\ &= \log(A(k)) + \log(V(k)) \end{aligned}$$

- Rückführung der Multiplikation auf eine Addition

Cepstral-Analyse

- Anregungs- und Vokaltraktanteil liegen im Cepstrum weit auseinander und können daher einfach getrennt werden ("liftering")



Brian van Osdol

- noch schärfere Ausprägung der Grundfrequenzspitze durch Quadrieren des Cepstrums

Merkmalsextraktion

- Signalerfassung
- Beschreibung im Zeitbereich
- Beschreibung im Frequenzbereich
- Cepstral-Analyse
- Linear Predictive Coding: LPC-Analyse
- Psychoakustisch inspirierte Techniken
- Gradientenmodellierung

Cepstral-Analyse

- Ziele:
 - Eliminieren der Anregungscharakteristik ("Glätten" des Spektrums)
 - Reduktion der Merkmalsdimensionalität
 - $\approx 20 \dots 24$ Frequenzgruppenfilter
 - $\approx 6 \dots 10$ Cepstralkoeffizienten

Cepstral-Analyse

- Cepstrum ist Abbildung in einen nichtlinear transformierten Zeitbereich ("Quefrenzy")

$$C(m) = \mathcal{F}^{-1}(\hat{X}(k)) = \mathcal{F}^{-1}(\log(\mathcal{F}(x(n))))$$

- drei Schritte
 - Fourier-Transformation
 - Logarithmieren
 - inverse Fourier-Transformation

Merkmalsextraktion

- Signalerfassung
- Beschreibung im Zeitbereich
- Beschreibung im Frequenzbereich
- Cepstral-Analyse
- Linear Predictive Coding: LPC-Analyse
- Psychoakustisch inspirierte Techniken
- Gradientenmodellierung

Linear Predictive Coding: LPC-Analyse

- autoregressives Modell: Vorhersage des aktuellen Abtastwertes $\tilde{x}(n)$ aufgrund der vorangegangenen K Abtastwerte
 - Linearkombination

$$\tilde{x}(n) = \sum_{k=1}^K \alpha_k x(n-k)$$

- zugehörige Systemfunktion (komplexes Allpol-Modell)

$$P(z) = \sum_{k=1}^K \alpha_k z^{-k}$$

- Vorhersagefehler

$$e(n) = x(n) - \tilde{x}(n) = x(n) - \sum_{k=1}^K \alpha_k x(n-k)$$

Merkmalsextraktion

LPC-Analyse 157

LPC-Analyse

- Finde einen Parametersatz $\alpha_1 \dots \alpha_K$, der den quadratischen Fehler $e(n)^2$ minimiert ($K \approx s[\text{kHz}] + 4 \approx 10 \dots 15$)
- Internes Modell der Sprachproduktion wird kontinuierlich an die Signalrealität adaptiert.
- Modellparameter dienen als (spektrale) Signalbeschreibung → Motor-Theory
- verschiedene Schätzverfahren
 - Kovarianzmethode
 - Autokorrelationsmethode
 - Lattice-Methode
- LPC-Analyse erlaubt zusätzlich auch die Ermittlung der Anregungscharakteristik aus dem Fehlerresiduum $e(n)$
- auch Cepstral-Transformation für LPC-Koeffizienten

Merkmalsextraktion

LPC-Analyse 159

Gehörbezogene Parameter

- Transformation der Spektralparameter
 - lautheitsbasierte Filterung
 - tonheitsbezogene Verzerrung der Frequenzachse
mel-Skala: logarithmische Approximation der Bark-Skala:

$$mel(f) = 2595 \log\left(1 + \frac{f}{700}\right)$$

- tonheitsbezogene Wichtung der Spektralparameter

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 161

Perzeptive LP-Analyse

- perzeptuelle Distanz zwischen Formanten ist viel kleiner als die Cepstral-Distanz der Maxima
 - Perception ist durch den Frontalbereich des Artikulationstrakts dominiert
 - Kindersprache ist verständlich, trotz erheblicher Abweichungen in der Spektralcharakteristik
 - zweiter Formant
 - enthält die meiste sprecherneutrale Information
 - korrespondiert mit dem Bereich der größten Empfindlichkeit der akustischen Wahrnehmung

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 163

LPC-Analyse

- Fehlersequenz ist Ausgabe eines Systems mit der Systemfunktion

$$A(z) = 1 - \sum_{k=1}^K \alpha_k z^{-k}$$

- entspricht unter der Annahme eines idealisierten Source-Filter-Modells genau der Übertragungsfunktion des Vokaltraktes $V(z)$ (inklusive Abstrahlungscharakteristik!)

LPC-Hypothese

- Falls der mittlere quadratische Fehler minimal ist, dann kann *angenommen* werden, dass die geschätzten Parameter des Prädiktors $P(z)$ genau den *Spektralkoeffizienten* von $V(z)$ entsprechen.
 - intuitive Stützung:
länger zurückliegende Signalabschnitte werden vorrangig durch die tieferfrequenten Spektralanteile beeinflusst

Merkmalsextraktion

LPC-Analyse 158

Merkmalsextraktion

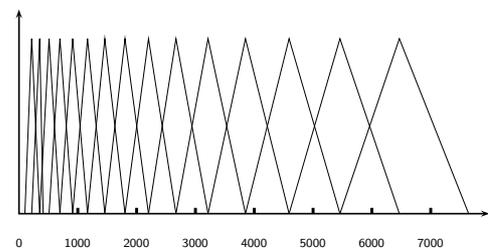
- Signalerfassung
- Beschreibung im Zeitbereich
- Beschreibung im Frequenzbereich
- Cepstral-Analyse
- Linear Predictive Coding: LPC-Analyse
- Psychoakustisch inspirierte Techniken
- Gradientenmodellierung

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 160

Gehörbezogene Parameter

- z.B. Filterung des Signals mit einer äquidistanten mel-Skalen-Filterbank



- mel-Cepstrum: Berechnung der Cepstralkoeffizienten auf der Basis der Parameter einer mel-Skalen-Filterbank

Merkmalsextraktion

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 162

Perzeptive LP-Analyse

- starke integrative Wahrnehmung beim Sprachverstehen
 - Integration über 3.5 Bark
 - nur grobe Form des Spektrums wird unterschieden
 - NEWTON (1665): Vokalsynthese durch Anblasen einer unterschiedlich weit gefüllten Bierflasche
 - HELMHOLTZ (1885): Vokale mit einem (/a/, /o/, /u/) bzw. zwei Maxima (/e/, /i/, /y/)
 - CHISTOVICH (1985): zwei Formanten werden perzeptuell zusammengefasst, wenn sie weniger als 3.5 Bark auseinanderliegen

Merkmalsextraktion

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 164

Perzeptive LP-Analyse

- PLP: Perceptive Linear Prediction analysis (HERMANSKY 1991)
- Grundlagen
 - Bandbreitenwahl in Übereinstimmung mit der Frequenzgruppenwahrnehmung
 - Lautheitsbezogene Wichtung der Frequenzanteile
 - Berücksichtigung der Intensitäts-Lautheits-Beziehung

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 165

Perzeptive LP-Analyse

- Vorteile
 - Approximation des perzeptuell wichtigen, sprecherinvarianten 2. Formanten
 - geringere Wichtung der hohen Frequenzen
 - Verringerung der Ungleichheit zwischen stimmhaften und stimmlosen Lautabschnitten
 - relativ gute Unabhängigkeit von der Länge des Vokaltrakts
 - größere Empfindlichkeit für Änderungen von F_1 und F_2

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 167

RASTA-Analyse

- RASTA-PLP: vor Schätzung der Allpol-Parameter:
 - nichtlineare Verzerrung (logarithmisch oder linear-logarithmisch)
 - Herausfiltern aller konstanten bzw. niedrigfrequenten Änderungen der Ausgangswerte der Frequenzgruppenfilterbank
 - inverse Verzerrung
 - Verwendung von Filtern mit hohem zeitlichen Integrationsintervall
- höhere Robustheit gegenüber
 - Änderungen in der Übertragungscharakteristik (Faltungsstörungen)
 - Nebengeräuschen (additive Störungen)
- starke Abhängigkeit vom vorangegangenen Signalkontext
 - reduzierte Erkennungsgenauigkeit bei kurzen, kontextunabhängigen Lautmodellen

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 169

Merkmalsextraktion

- Signalerfassung
- Beschreibung im Zeitbereich
- Beschreibung im Frequenzbereich
- Cepstral-Analyse
- Linear Predictive Coding: LPC-Analyse
- Psychoakustisch inspirierte Techniken
- Gradientenmodellierung

Merkmalsextraktion

Gradientenmodellierung 171

Perzeptive LP-Analyse

- Teilschritte
 - Spektraltransformation
 - Verzerren der Frequenzachse entsprechend der Bark-Skala
 - Faltung mit der Frequenzgruppenkurve und Abtastung
 - Korrektur der Intensität auf gleiche Lautheit
 - Verzerrung der Intensität entsprechend einer linearen Lautheitswahrnehmung
- Allpol-Modell 5. Grades ist optimal
 - max. 2 Formanten darstellbar!
- starke Korrelation von F_2 für PLP und Perzeption

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 166

RASTA-Analyse

- Ziel: Reduktion der Abhängigkeit von der Spektralcharakteristik des Übertragungskanal (Mikrofon, ...)
- Subtraktion des spektralen Langzeitmittels
 - aber: in Echtzeitanwendungen schwierig zu ermitteln
- RASTA (HERMANSKY UND MORGAN 1994): Auswertung relativer spektraler Eigenschaften
 - Filtern langsamer Änderungen im Signal
- perzeptionspsychologische Fundierung:
 - Lautwahrnehmung verbleibt, auch wenn seine Formantstruktur eingeebnet wurde
 - Vokalperzeption wird durch die spektrale Differenz zum vorangegangenen Laut determiniert

Merkmalsextraktion

Psychoakustisch inspirierte Techniken 168

Innenohrmodelle

Gradientenmodellierung

- Δ -Koeffizienten: Anstieg des Parameterverlaufs zum Zeitpunkt t
- ideal:

$$\frac{dx(n, t)}{dt}$$

- Approximation 1: Regressionskoeffizienten

$$\frac{dx(n, t)}{dt} \simeq \Delta x(n, t) = \frac{\sum_{k=-K}^K k w(k) x(n, t + k)}{\sum_{k=-K}^K k^2 w(k)}$$

- Fenster $w(k)$, meist Rechteckfenster

$$w(k) = 1 \text{ für } -K \leq k \leq K$$

- typische Fensterbreite: 50 ms

Merkmalsextraktion

Gradientenmodellierung 172

Gradientenmodellierung

- Approximation 2: komponentenweise Differenzbildung zwischen benachbarten Merkmalvektoren

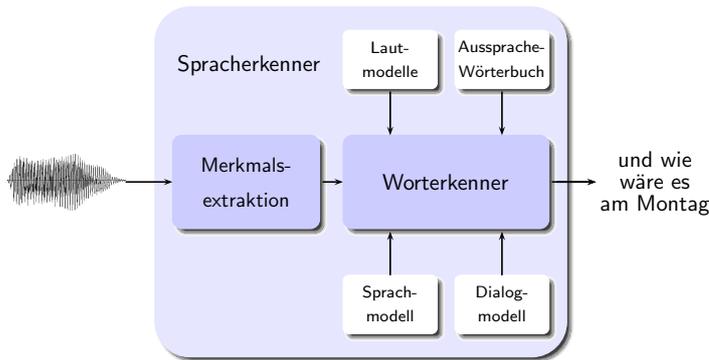
$$\frac{dx(n, t)}{dt} \simeq \Delta x(n, t) = x(n, t) - x(n, t - 1)$$

- auch Δ^2 -Parameter

Grundlagen der Sprachsignalerkennung

- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- **Worterkennung**
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

Überblick Spracherkennung



Klassifikation von atomaren Objekten

- subsymbolische \rightarrow symbolische Beschreibung
- Rückführung auf eine Extremwertentscheidung
 - Unterscheidungsfunktion $D(k, \vec{x})$

$$k(\vec{x}) = \arg \max_k D(k, \vec{x})$$

$$k(\vec{x}) = \arg \min_k D(k, \vec{x})$$

Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Klassifikation von atomaren Objekten

- Training der Modellparameter auf Datensammlungen
 - Lernstichprobe
 - Paare aus Merkmalsvektor und Klassenzugehörigkeit
 - Schätzung der Klassifikatorparameter
 - Optimierungskriterium
 - minimaler Erwartungswert für Fehlentscheidungen
 - bei sehr unausgewogenen Verteilungen aber problematisch

Instanzenbasierte Klassifikatoren

- Nearest-Neighbor-Klassifikator
 - Training: Vollständiges Abspeichern der Lernstichprobe

$$S = \{S_i | i = 1, \dots, I\}$$
 - jedes Stichprobenelement besteht aus Merkmalvektor \vec{x}_i und seiner Klassenzugehörigkeit $k(s_i)$

$$s_i = (\vec{x}_i, k(s_i)) \quad i = 1, \dots, I$$
 - Klassifikation:
 - Berechnung der Distanz zu allen Elementen der Lernstichprobe

$$d(\vec{x}, \vec{x}_i) \quad i = 1, \dots, I$$
 - Entscheidung für die Klasse des Stichprobenelementes mit der minimalen Distanz

$$k(\vec{x}) = k(s_i) \text{ mit } i = \arg \min_i d(\vec{x}, \vec{x}_i)$$

Distanzmaße

- City-Block-Distanz

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=1}^I |x_i - y_i|$$
- Euklidische Metrik

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=1}^I (x_i - y_i)^2$$
- gewichtete Euklidische Metrik

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=1}^I w(i)(x_i - y_i)^2$$
- Gewichtsfunktion $w(i)$
 - inverse Varianz: günstig insbesondere für Cepstralkoeffizienten
 - peak-weighted distance: Betonung der spektralen Maxima

- LPC-basierte Abstandsmaße
 - Maximum-Likelihood-Distanz (Itakura-Saito-Distanz)
 - cosh-Maß (symmetrische Maximum-Likelihood-Distanz)
 - Vorhersage-Residuum
 - Rücktransformiertes Vorhersage-Residuum

Probabilistische Klassifikatoren

- Naiver BAYES-Klassifikator
- Annahme einer Verteilungsfunktion
- Training: Schätzen der Parameter einer statistischen Verteilung für alle Stichprobenelemente gleicher Klassenzugehörigkeit $p(x|k)$
- Entscheidung nach maximaler *a posteriori*-Wahrscheinlichkeit für die Klassenzugehörigkeit
- BAYES-Entscheidungsregel

$$p(k|x) = \frac{p(k) p(x|k)}{p(x)}$$

- x Beobachtung
- k Klassenzugehörigkeit
- $p(k)$ *a priori*-Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit

Probabilistische Klassifikatoren

- Klassifikatoren mit Rückweisung
 - zusätzliche neutrale Klasse
 - Senkung der Fehlerrate
 - Annahme: Rückweisung ist weniger problematisch als eine Fehlentscheidung

Probabilistische Klassifikatoren

- Klassifikatoren mit unsymmetrischer Kostenfunktion
- unerwünschte Klassifikationsfehler werden mit besonders hohen Kosten belegt
 - Fehldiagnose beim medizinischen Screening
 - Fehllarm in der Anlagenüberwachung
 → geringere Kosten als ein irrtümlich nicht ausgelöster Alarm
- Ereignisdetektion für unterspezifizierte phonologische Beschreibungen
 - fehlendes Merkmal kann eventuell durch Kontextinformation kompensiert werden (Prinzip der Informationsanreicherung)
- Detektion von Aussprachefehlern (Fremdsprachenlernen)
 - Fehler sind deutlich seltener als korrekte Lautrealisierungen
 - andererseits: unberechtigte Kritik ist problematisch; Ignorieren von Fehlern nicht so sehr
- auch für Worterkennung
 - domänenspezifische Relevanz von Wortformen

- Potentialfunktionenklassifikator
 - Unterscheidungsfunktion als Summe von Potentialfunktionen über den Stichprobenwerten

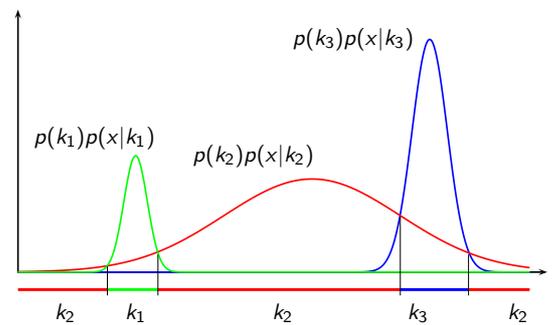
$$D(k, \vec{x}) = \sum_{i=1}^I f_{pot}(i, k)$$

- Wahl von f_{pot}
 - Maximum an der Stelle des Stichprobenelementes
 - monoton fallend mit wachsender Distanz zum Stichprobenelement
 - Nearest-Neighbor-Klassifikator ist ein Spezialfall
- keine Generalisierung über der Lernstichprobe
- Klassifikationsaufwand wächst mit der Stichprobengröße

Probabilistische Klassifikatoren

- Annahme: $p(x)$ ist konstant für alle x

$$D(k, \vec{x}) = p(k|\vec{x}) = p(k) p(\vec{x}|k)$$



Probabilistische Klassifikatoren

- kostenbehaftete Klassifikation: Kostenfunktion c_{ki}
 - Kosten (penalty) für alle Entscheidungsmöglichkeiten des Klassifikators
 - Optimierung auf mittlere minimale Kosten
 - BAYES-Klassifikator: (0,1)-Kostenfunktion

$$c_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{für } k = i \\ 1 & \text{für } k \neq i \end{cases}$$

- Kostenfunktion für Klassifikatoren mit Rückweisung

$$c_{kk} < c_{0i} < c_{ki} \text{ mit } i, k = 1 \dots K, k \neq i$$

$$c_{ki} = c_{ik}$$

Probabilistische Klassifikatoren

- Unterscheidungsfunktion für Klassifikator mit Kostenfunktion

$$D(k, \vec{x}) = \sum_{i=1}^K (1 - c_{ki}) p(i) p(\vec{x}|i)$$

$$k(\vec{x}) = \arg \max_k D(k, \vec{x})$$

Verteilungsfreie Klassifikatoren

- Approximation eines BAYES-Klassifikators durch einen äquivalenten Klassifikator mit (mathematisch) einfacherer Unterscheidungsfunktion
 - Linearklassifikator
 - stückweise-linearer Klassifikator (→ Perzeptron, Neuronale Netze)

Worterkennung

Distanzmaße 189

Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 190

Wahrscheinlichkeitsverteilungen

- diskrete Verteilungen
 - Verteilungsvektoren
 - Gleichverteilung
 - POISSON-Verteilung
- kontinuierliche Verteilungen
 - Gauss-Verteilung
 - Multivariate Gauss-Verteilung
 - Mischverteilungen

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 191

Diskrete Verteilungen

- Verteilungsvektoren (Aufzählung der Verteilungswerte)

$$(p(x_1|k), p(x_2|k), \dots, p(x_n|k))$$

- Parameter: $p(x_1|k), p(x_2|k), \dots, p(x_n|k)$
 - nur für endliche Mengen von Beobachtungen
 - auch für nichtnumerische Daten geeignet
 - hohe Parameterzahl, aber dennoch oft genutzt
- Gleichverteilung (für M Ereignisse)

$$p(x|k) = \frac{1}{M}$$

- als Diskriminanzfunktion ungeeignet

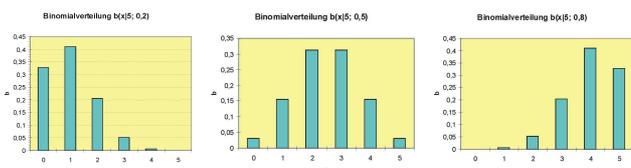
Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 192

Diskrete Verteilungen

- z.B. Binomialverteilung
 - 2-Klassen-Auswahl mit Zurücklegen
 - n : Anzahl der Versuche
 - k : Anzahl der ausgewählten Objekte einer Klasse

$$p(k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$



- "Normalverteilung" für diskrete Ereignisse bei hinreichend großem n

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 193

Diskrete Verteilungen

- alternative Verteilungen
 - hypergeometrische Verteilung
 - Poisson-Verteilung
- erfordern eine numerische Ordnung auf den Beobachtungsdaten
- nur für Spezialfälle geeignet (z.B. Längenmodellierung)

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 194

Kontinuierliche Verteilungen

- Wahrscheinlichkeitsdichten statt Wahrscheinlichkeiten
- Normalverteilung (GAUSS-Verteilung, GAUSS'sche Glockenkurve)

$$p(x|k) = \mathcal{N}[x, \mu, \sigma] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- LAPLACE-Verteilung

$$p(x|k) = \mathcal{L}[x, \mu, \sigma] = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x-\mu|}{\sigma}}$$

- Parameter:
 - Mittelwert μ
 - Varianz σ

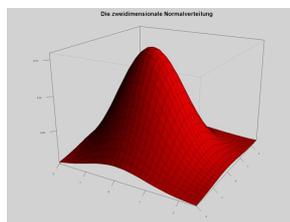
Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 195

Kontinuierliche Verteilungen

- Verteilungen für mehrdimensionale Ereignisse
- z.B. multivariate Normalverteilung

$$p(\vec{x}|k) = \mathcal{N}[\vec{x}, \vec{\mu}, \Sigma]$$



- Parameter:
 - Mittelwertvektor $\vec{\mu}$
 - Kovarianzmatrix Σ

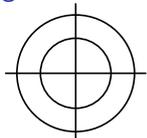
Worterkennung

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 196

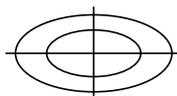
Kontinuierliche Verteilungen

diagonale Kovarianzmatrix
uniform besetzt
(rotationssymmetrisch zum
Mittelpunktvektor)



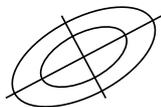
$$\sigma_{ij} = \begin{cases} n & \text{für } i = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

diagonale Kovarianzmatrix
beliebig besetzt
(axialsymmetrisch)



$$\sigma_{ij} = \begin{cases} n_i & \text{für } i = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

vollständig besetzte
Kovarianzmatrix



Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 197

Kontinuierliche Verteilungen

- Abstandsklassifikator ist Spezialfall eines BAYES-Klassifikators mit
 - rotationssymmetrischer multivariater Normalverteilung und
 - gleichen a priori Wahrscheinlichkeiten

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 199

Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung**
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Worterkennung

Vektorquantisierung 201

Vektorquantisierung

- Clustering der Merkmalsvektoren zur Datenreduktion
 - Ersetzen der gemessenen (hochdimensionalen) Merkmalsvektoren durch ein Symbol aus einer endlichen Symbolmenge S

$$\vec{x} \mapsto k \text{ mit } k \in S = \{s_1, \dots, s_K\}$$

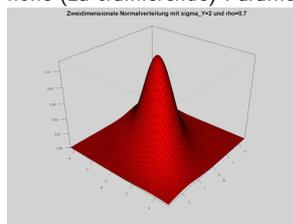
- jedes Klassensymbol $s \in S$ steht für einen Prototypvektor \vec{x}_i (Kodebuch)
 - keine extern vorgegebene Interpretation für die Klassen
 - nur Anzahl der Klassen vorgegeben
 - Lernstichprobe besteht aus Merkmalsvektoren ohne Klassenzuordnung
 - unüberwachtes Lernen ("Lernen ohne Lehrer")
- Elemente von S meist Binärzahlen: $\text{card}(S) = 2^R$
 R : Quantisierungsrate in bit/Vektor

Worterkennung

Vektorquantisierung 203

Kontinuierliche Verteilungen

- diagonal besetzte Kovarianzmatrix: unkorrelierte Merkmale
relativ geringe (zu trainierende) Parameterzahl
- voll besetzte Kovarianzmatrix: korrelierte Merkmale
hohe (zu trainierende) Parameterzahl



- Dekorrelation der Merkmale: Transformation des Koordinatensystems
Principal Component Analysis, Karhunen-Loève-Transformation

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 198

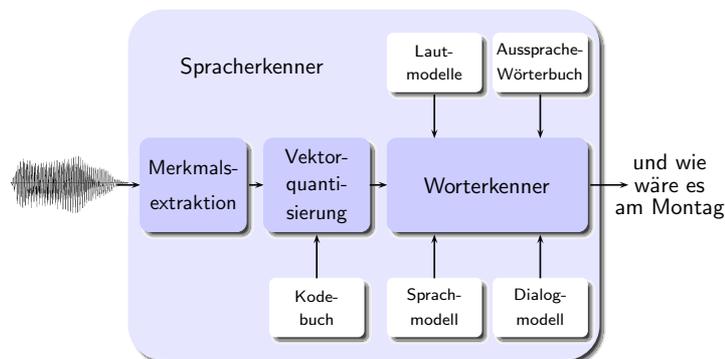
Verteilungen

- Verteilungen sind immer nur Modellannahmen über die Realität
 - Modellparameter werden geschätzt
 - Maß für die Güte des Modells: Konfidenz
 - Abschätzung der Modellgüte über die Varianz
 - Modellevaluation über die Erkennungsergebnisse

Worterkennung

Wahrscheinlichkeitsverteilungen 200

Vektorquantisierung



Worterkennung

Vektorquantisierung 202

Vektorquantisierung

- Nearest-Neighbor-Mapping

$$k(\vec{x}) = k(\vec{x}_i | i = \arg \min_j d(\vec{x}, \vec{x}_j))$$

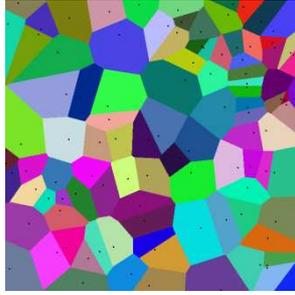
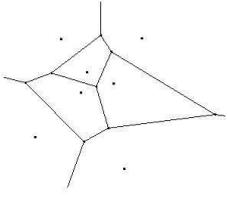
- Distanzmaß
 - Euklidische Distanz
 - ITAKURA-SAITO-Distanz (für LPC-Koeffizienten)

Worterkennung

Vektorquantisierung 204

Vektorquantisierung

- vollständige Aufteilung des Merkmalsraumes in Teilbereiche



VORONOI- oder DIRICHLET-Partitionierung

Vektorquantisierung

- Ermittlung der Prototypvektoren \vec{x}_i

$$\vec{x}_i = \text{cent}(i) = \arg \min_j E(d(\vec{x}, \vec{x}_j) | k(\vec{x}) = i)$$

Zuordnung des Zentroiden jeder Klasse als Prototypvektor
Mittelwertschätzung

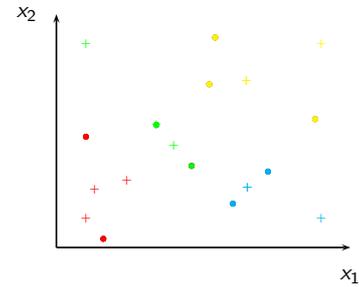
- Teufelskreis:
 - die Zentroidenermittlung setzt Klasseneinteilung voraus
 - die Klasseneinteilung erfolgt aufgrund der Kenntnis der Zentroiden
- rekursive Verfeinerung

Vektorquantisierung

- Partitionierung des Merkmalsraumes
Ermitteln der optimalen Zentroiden für eine gegebene Klassenanzahl

Algorithmus:

1. Festlegen eines initialen Kodebuches (beliebige Wahl von K Zentroiden)
2. Klassifizierung der Stichprobe nach der Nearest-Neighbor-Regel
3. Berechnung der mittleren Distanz für jede Klasse
4. Berechnung neuer Zentroiden für jede Klasse
5. Klassifizierung der Stichprobe nach der Nearest-Neighbor-Regel
6. Ermittlung der mittleren Distanz für jede Klasse
 - Unterschreitet die Änderung der mittleren Distanz einen vorgegeben Schwellwert → Abbruch
 - sonst → 4

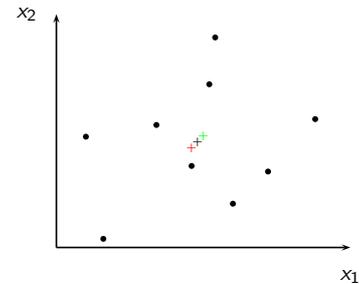


Vektorquantisierung

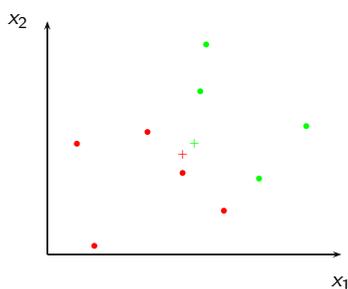
- Festlegen eines initialen Kodebuches durch rekursives Aufspalten der Kodeklassen

Algorithmus:

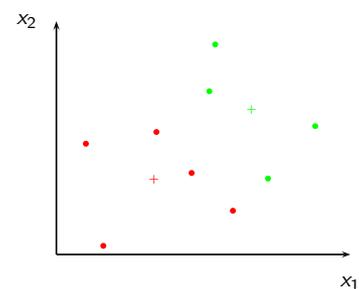
1. Start mit einem Zentroiden (Mittelwertvektor aller Stichprobenelemente)
2. Aufspalten des / der Zentroiden
 - Zufällige Störung oder
 - Wahl von zwei Punkten mit maximaler Distanz
3. Ermittlung der optimalen Zentroiden (s.o.)
 - Gewünschte Zahl von Kodeklassen erreicht → Abbruch
 - sonst: → 2

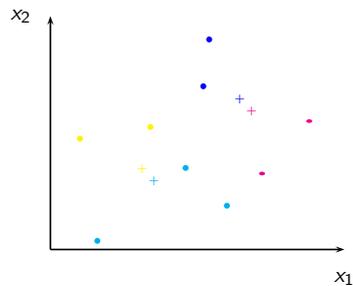
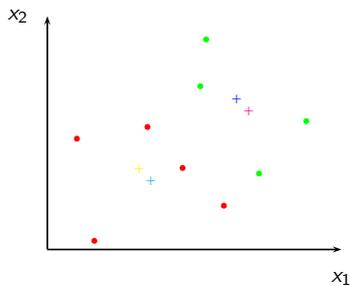


Vektorquantisierung

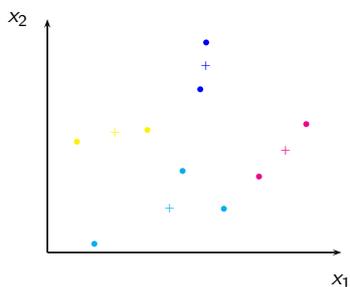


Vektorquantisierung





Vektorquantisierung



Vektorquantisierung

- Zusätzliche Partitionierungsheuristiken
 - Wenn eine Klasse zu viele Stichprobenelemente enthält, zerlege sie.
 - Wenn zwei Klassen zu dicht benachbart sind, vereinige sie.

Vektorquantisierung

- Quantisierungsfehler
- gemessen am dekodierten Sprachsignal
- Störabstand

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\vec{x}} \|\vec{x}\|^2}{\sum_{(\vec{x}, \hat{\vec{x}})} d(\vec{x}, \hat{\vec{x}})}$$

\vec{x} gemessener Inputvektor
 $\hat{\vec{x}}$ quantisierter Outputvektor

- Störabstand für Zeitsignalkodierung (Quantisierungsrate: 1 bit/Abtastwert, Abtastfrequenz 6.5 kHz)

Kodebuchgröße	2	4	8	16	32	64	128	256
Störabstand	2.1	5.3	6.0	7.0	7.6	8.1	8.4	8.8

Vektorquantisierung

- Störabstand für die Kodierung von LPC-Koeffizienten Modell 10. Ordnung, untertrainiert

Kodebuchgröße	2	4	8	16	32	64	128	256
Quantisierungsr.	.008	.016	.023	.031	.039	.047	.055	.062
Störabstand	2.9	5.2	6.2	7.9	8.8	9.5	10.1	10.7

- weitere Verbesserungen
 - Vektorquantisierung mit Gedächtnis
 - adaptive Vektorquantisierung
 - Zerlegung des Merkmalsvektors und Verwendung mehrerer Kodebücher

Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Klassifikation von Objektsequenzen

- Sprache als Folge von atomaren Objekten?
 - frameweise Klassifikation: Mikrophoneme
 - mit anschließender Glättung
 - nicht sehr erfolgreich
- Vergleich zwischen Sequenzen
 - Mustersequenzen $\vec{x}_k[1:N_k]$ mit $i = 1, \dots, I$
 - Inputsequenz $\vec{x}[1:N]$
 - Ziel: Abstandsklassifikator
 - ab sofort Vektornotation auch ohne Pfeil: $x[m]$, $x_k[n]$

Klassifikation von Objektsequenzen

- "naiver" Ansatz: lineare Distanz
 - Ermitteln eines Distanzmaßes für jedes Vektorpaar

$$d(x[m], x_k[n]) \text{ mit } n = m$$

- Summierung über die Sequenz

$$d(x[1:M], x_k[1:N]) = \sum_{j=1}^J d(x[j], x_k[j])$$

$$\text{mit } J = \min\{M, N\}$$

- Auswahl desjenigen Musters mit der minimalen Distanzsumme

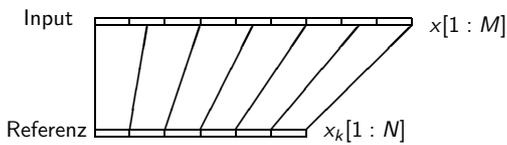
$$k(x[1:M]) = \arg \min_k d(x[1:M], x_k[1:N_k])$$

Worterkennung

Klassifikation von Objektsequenzen 221

Klassifikation von Objektsequenzen

- normierte lineare Distanz
 - alle Vektorsequenzen werden auf eine normierte Länge gestreckt oder gestaucht (Wortmuster und Inputsequenzen)



- lineare Streckung
 - Aufteilung der Vektorsequenz in eine vorgegebene Anzahl von Zeitintervallen
 - bei Bedarf lineare Interpolation

Worterkennung

Klassifikation von Objektsequenzen 223

Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Worterkennung

Nichtlineare Zeitnormierung 225

Nichtlineare Zeitnormierung

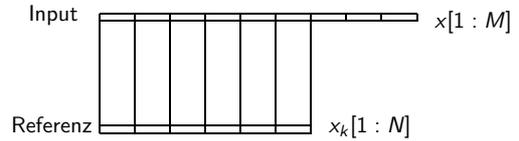
- diskrete Signalrepräsentation
- jede Zeitverzerrung läßt sich auf eine kleine Menge zulässiger Elementarzuordnungen zurückführen
 - einem Element im Input entspricht ein Element im Muster
 - einem (oder mehreren) Element(en) im Input entspricht kein Element im Muster
 - Überspringen von Merkmalvektoren im Muster
 - Strecken der Inputsequenz
 - einem (oder mehreren) Elementen im Muster entspricht kein Element im Input
 - Überspringen von Merkmalvektoren im Input
 - Stauchen der Inputsequenz

Worterkennung

Nichtlineare Zeitnormierung 227

Klassifikation von Objektsequenzen

- zeitliche Länge von Wortrealisierungen ist variabel: $M \neq N_k$



- äquidistante Zuordnung

→ Zeitnormierung ist erforderlich

Worterkennung

Klassifikation von Objektsequenzen 222

Klassifikation von Objektsequenzen

- in praktischen Realisierungen auch mehrere Referenzmuster für ein Wort
 - Nearest-Neighbor-Klassifikator

$$k(x[1:M]) = k(x_i[1:N_i])$$

$$\text{mit } i = \arg \min_i d(x[1:M], x_i[1:N_i])$$

Worterkennung

Klassifikation von Objektsequenzen 224

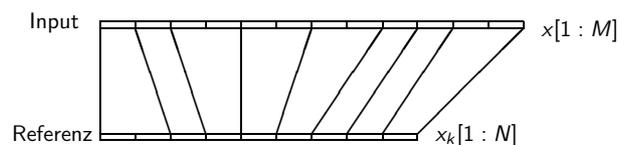
Nichtlineare Zeitnormierung

- lineare zeitliche Streckung des Sprachsignals ist starke Idealisierung
 - Sprechgeschwindigkeit ist auch innerhalb eines Wortes variabel
 - Schnellsprache verkürzt nur die stationären Phasen
- Ziel: dynamische Zuordnung (dynamic time warping, DTW), erste Erfolgsstory der Spracherkennung

Worterkennung

Nichtlineare Zeitnormierung 226

Nichtlineare Zeitnormierung



Worterkennung

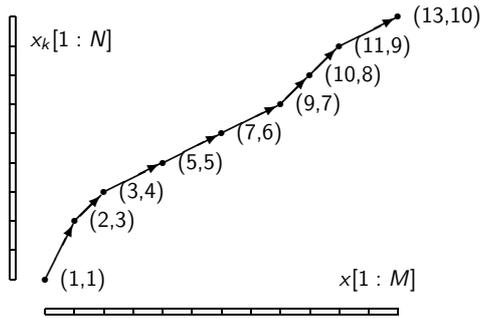
Nichtlineare Zeitnormierung 228

Nichtlineare Zeitnormierung

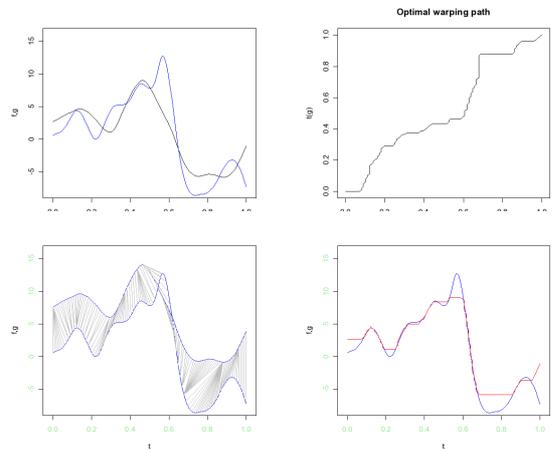
- Verzerrungs-Funktion (Warping-Funktion)

$$V = v_1 \dots v_l \text{ mit } v_i = (m_i, n_i)$$

$$d(v_i) = d(x[m_i], x_k[n_i])$$

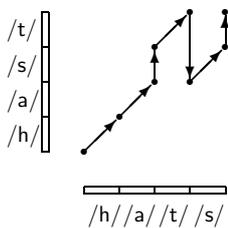


Nichtlineare Zeitnormierung



Nichtlineare Zeitnormierung

- keine beliebigen Verzerrungsfunktionen zugelassen
 - z.B. Monotonitätsbedingung



Nichtlineare Zeitnormierung

- slope-Constraint für die Warping-Funktion
- z.B. SAKOE-CHIBA mit Auslassungen

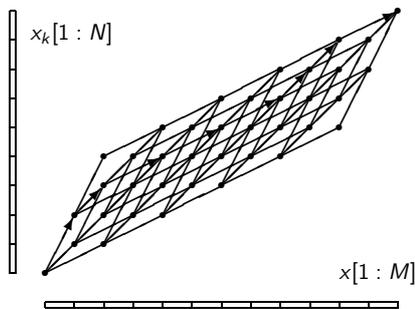
$$v_{i-1} = \begin{cases} (m_i - 1, n_i - 1) \\ (m_i - 2, n_i - 1) \\ (m_i - 1, n_i - 2) \end{cases}$$



- symmetrisches slope-Constraint

Nichtlineare Zeitnormierung

- Trellis



Nichtlineare Zeitnormierung

- Distanz zweier Vektorsequenzen

$$d(x[1:M], x_k[1:N]) = \min_{\forall V} \sum_{i=1}^l d(v_i)$$

V: Warping-Funktionen

- mit Normierungskoeffizienten w_i

$$d(x[1:M], x_k[1:N]) = \min_{\forall V} \frac{\sum_{i=1}^l d(v_i) w_i}{\sum_{i=1}^l w_i}$$

mit $d(v_i) = d(x[m_i], x_k[n_i])$

Nichtlineare Zeitnormierung

- symmetrische Normierung

$$w_i = (m_i - m_{i-1}) + (n_i - n_{i-1}) \text{ mit } \sum_{i=1}^l w_i = M + N$$

Normierung auf die gemeinsame Länge von Input und Muster

- asymmetrische Normierung

$$w_i = (m_i - m_{i-1}) \text{ mit } \sum_{i=1}^l w_i = M$$

$$d(x[1:M], x_k[1:N_k]) = \frac{1}{M} \min_{\forall V} \sum_{i=1}^l d(v_i) w_i$$

Normierung auf die Länge der Inputsequenz

Nichtlineare Zeitnormierung

- alternative slope-Constraints
 - SAKOE-CHIBA ohne Auslassungen

$$v_{i-1} = \begin{cases} (m_i - 1, n_i - 1) \\ (m_i, n_i - 1) \\ (m_i - 1, n_i) \end{cases}$$



- ITAKURA (asymmetrisch)

$$v_{i-1} = \begin{cases} (m_i - 1, n_i) \\ (m_i - 1, n_i - 1) \\ (m_i - 1, n_i - 2) \end{cases}$$



- erfordert zusätzliche globale Constraints
- Vorteil: bei asymmetrischer Normierung gilt immer $w_i = 1$

$$d(x[1:M], x_k[1:N]) = \frac{1}{M} \min_{\forall V} \sum_{i=1}^l d(v_i)$$

Nichtlineare Zeitnormierung

- algorithmische Realisierung: Dynamische Programmierung
 - Optimierungsverfahren, Suche in Graphen
 - Graph ist Suchraum aus verschiedenen Zuordnungsvarianten zwischen Muster- und Inputsequenz
 - Suchraum durch die slope-Constraints definiert
 - Wege im Graphen sind bewertet (Distanzmaß an den Knoten)

Prinzip der dynamischen Programmierung (BELLMANN)

Führen zwei Wege zu einem Knoten, so wird der partiell optimale Weg Bestandteil des global optimalen Weges sein, wenn der Knoten Bestandteil des globalen Optimums ist.

Nichtlineare Zeitnormierung

- Rückführung eines globalen Optimierungsproblems durch Rekursion auf lokale Optimalitätsentscheidungen
- für ITAKURA-Constraint:

$$d(x[1:i], x_k[1:j]) = \min \left\{ \begin{array}{l} d(x[1:i-1], x_k[1:j]) \\ d(x[1:i-1], x_k[1:j-1]) \\ d(x[1:i-1], x_k[1:j-2]) \end{array} \right\} + d(x[i], x_k[j])$$

Nichtlineare Zeitnormierung

- Training: Abspeichern von Wortmustern
 - rein instanzbasiert
 - keine Generalisierungen über Klasseneigenschaften
- Alternativen
 - mehrere Muster pro Klasse
 - ~> Nearest-Neighbor-Klassifikator für sequenzielle Objekte
 - nichtsequentielle Muster (Phonographen)
 - Training geht nicht mehr
 - manuell erarbeiten
 - zu aufwendig

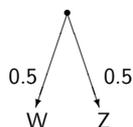
Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Hidden-Markov-Modellierung

- diskrete stochastische Quellen ohne "Gedächtnis"
 - Beispiel: Münzwurf
 - gleichverteiltes Zweiklassenproblem

$$p_e(Z) = p_e(W) = 0.5 \quad (\text{Emissionswahrscheinlichkeiten})$$



DTW-basierte Systeme

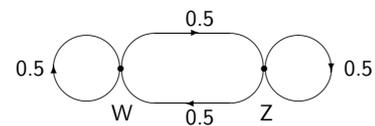
- VINTSJK 1969, SAKOE UND CHIBA 1970
- ITAKURA 1975
 - isolierte Wortformen, sprecherabhängig
 - 200 Wortformen, 1 Muster pro Wortform
 - Worterkennungsrate: 97%
- RABINER ET AL. 1979
 - isolierte Wortformen, mehrere Sprecher (nicht sprecherunabhängig!)
 - 39 Wortformen, 100 Sprecher, 1 Muster pro Wortform und Sprecher
 - Worterkennungsrate: 79%
- SAKOE 1979
 - einfache Form verbundener Sprache, sprecherabhängig
 - 10 Zahlworte, bis zu vier Zahlworte in Folge
 - Worterkennungsrate: 99.6%

Hidden-Markov-Modellierung

- Ziel: stochastische Verteilungen als Diskriminanzfunktion
 - diskrete Verteilungen
 - kontinuierliche Verteilungen
- generalisierte Beschreibungen für Klassen, nicht für Instanzen

Hidden-Markov-Modellierung

- Markov-Modelle: diskrete stochastische Quellen mit "Gedächtnis"
 - Zustände z_i
 - Übergangswahrscheinlichkeiten $p_t(z_i|z_j, \dots, z_k)$
 - Markov-Modelle erster Ordnung: Übergangswahrscheinlichkeit hängt nur von dem aktuellen Zustand ab: $p_t(z_i|z_j)$
 - "Gedächtnis" der Länge eins
 - Münzwurf: jedem Zustand wird eine Münzseite zugeordnet

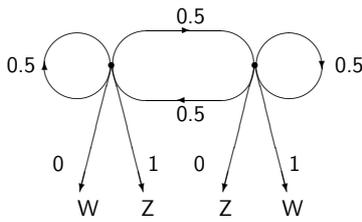


$$p(W|Z) = p(Z|W) = p(W|W) = p(Z|Z) = 0.5$$

→ unterschiedliche Modelle für den gleichen stochastischen Prozeß

Hidden-Markov-Modellierung

- Hidden-Markov-Modelle
 - Trennung von Ereignissen und Zuständen
 - Zustände z_i
 - Übergangswahrscheinlichkeiten $p_t(z_i|z_j)$
 - Emissionswahrscheinlichkeiten $p_e(x|z_j)$

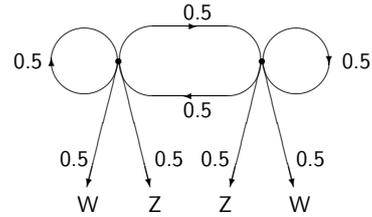


Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 245

Hidden-Markov-Modellierung

- unterschiedliche Modelle können die gleiche Beobachtung beschreiben
- zwei Münzen, zufällig gewählt



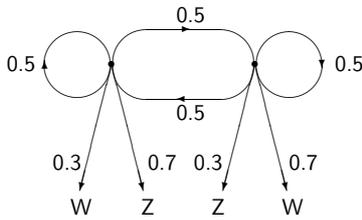
- externe Beobachtbarkeit ist stark eingeschränkt
In welchen Zustand befindet sich das Modell?
Mit welcher Münze wurde das Ergebnis ermittelt?

Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 246

Hidden-Markov-Modellierung

- zwei "gezinkte" Münzen, zufällig ausgewählt



- Langzeitbeobachtung ist unverändert

$$p(Z) = p(W) = 0.5$$

- auch Modelle mit mehr als zwei Zuständen möglich

Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 247

Hidden-Markov-Modellierung

- Hidden-Markov-Modelle bieten einen extrem flexiblen Rahmen, um Modellstrukturen an Beobachtungsdaten anzupassen.
 - Modellstrukturen
 - verborgene Zustände
 - Übergangswahrscheinlichkeiten
 - Emissionswahrscheinlichkeiten
 - Beobachtungsdaten: emittierte Symbole

Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 248

Hidden-Markov-Modellierung

- Modellierung
 - Wahl der Modellstruktur
 - Schätzen der Modellparameter
- Modellstrukturen
 - ergodische Markov-Modelle: Übergang zwischen beliebigen Zuständen möglich

$$P_t = \begin{bmatrix} p(1|1) & p(2|1) & \dots & p(m|1) \\ p(1|2) & p(2|2) & \dots & p(m|2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p(1|m) & p(2|m) & \dots & p(m|m) \end{bmatrix}$$

Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 249

Hidden-Markov-Modellierung

- Sprachsignal ist zeitlich strikt geordnete Ereignissequenz
- Rückkehr zu früheren Zuständen ist kann ausgeschlossen werden
- nur "obere" Dreiecksmatrix besetzt

$$P_t = \begin{bmatrix} p(1|1) & p(2|1) & \dots & p(m|1) \\ 0 & p(2|2) & \dots & p(m|2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & p(m|m) \end{bmatrix}$$

- zusätzliche Einschränkung auf "kurze Sprünge"

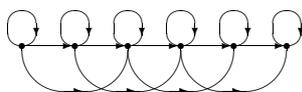
$$P_t = \begin{bmatrix} p(1|1) & p(2|1) & p(3|1) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & p(2|2) & p(3|2) & p(4|2) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & p(3|3) & p(4|3) & p(5|3) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix}$$

Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 250

Hidden-Markov-Modellierung

- Bakis-Modell (BAKIS 1976)



- vgl. ITAKURA-Constraint
- weitere Vereinfachung: Weglassen der Sprünge
- Symbolvorrat
 - Signalbeobachtungen, z.B. quantisierte Merkmalsvektoren

Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 251

Hidden-Markov-Modellierung

- Bewerten der Modellgüte:
 - Gegeben: HMM $\mathcal{M} = (\mathcal{Z}, P_i, P_t, P_e)$ und eine Signalbeobachtung $x[1:m]$
 - Gesucht: $p(x[1:m]|\mathcal{M})$
 - Wahrscheinlichkeit, daß die Signalbeobachtung $x[1:m]$ durch das Modell \mathcal{M} erzeugt wurde
 - Bewertung der "Güte" des Modells
 - \rightarrow Distanzmaß $d(x[1:m], \mathcal{M}) = p(x[1:m]|\mathcal{M})$
 - Vorwärts-Algorithmus (manchmal auch Vorwärts-Rückwärts-Algorithmus)
- Suche der optimalen Zustandsfolge
 - Gegeben: HMM $\mathcal{M} = (\mathcal{Z}, P_i, P_t, P_e)$ und eine Signalbeobachtung $x[1:m]$
 - Gesucht: "optimale" Zustandsfolge, die das Signal erzeugen würde
 - Viterbi-Algorithmus

Worterkennung

Hidden-Markov-Modellierung 252

Hidden-Markov-Modellierung

- Schätzen der Modellparameter
Gegeben: eine Zustandsmenge \mathcal{Z} und eine Signalbeobachtung $x[1:m]$
Gesucht: Parametervektoren und -matrizen P_i, P_t und P_e
 - Vorwärts-Rückwärts-Algorithmus, BAUM-WELCH-Algorithmus

Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen

- Vorwärts-Algorithmus
 - Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Beobachtung $x[1:n]$ durch ein Modell \mathcal{M} erzeugt wurde
$$p(x[1:N]|\mathcal{M}) = \sum_{\forall L} p(x[1:n]|L, \mathcal{M}) p(L|\mathcal{M})$$

$L = l_1, l_2, \dots, l_l$	beliebiger Pfad in \mathcal{M}
$p(L \mathcal{M})$	Wahrscheinlichkeit von L in \mathcal{M}
$p(x[1:N] L, \mathcal{M})$	Wahrscheinlichkeit, daß die Beobachtung $x[1:n]$ durch den Pfad L in \mathcal{M} erzeugt wurde

Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen

- Umwandlung in rekursive Rekombinationsgleichung
- Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung der Gesamtsequenz am Endknoten
 - Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung der um ein Element verringerten Sequenz an allen Vorgängerknoten
 - Wahrscheinlichkeit für den Übergang von den Vorgängerknoten
 - Emissionswahrscheinlichkeit für das letzte Element der Sequenz
- Vorwärtskoeffizienten $\alpha_n(i)$: Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung einer Teilsequenz $x[1:n]$ durch alle Pfade zum Zustand z_i

Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen

- Ermittlung der wahrscheinlichsten Zustandsfolge
- Voraussetzung: Rückwärtskoeffizienten analog zu den Vorwärtskoeffizienten
$$\beta_n(i) = p(x[n:N]|z_i = l_n, \mathcal{M})$$
$$\beta_N(i) = 1$$
$$\beta_n(j) = \sum_{i=1}^l p_t(z_i|z_j) p_e(x[n+1]|z_i) \beta_{n+1}(i)$$
- $\gamma_n(i)$: Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich das Modell \mathcal{M} zur Zeit n im Zustand z_i befindet
$$\gamma_n(i) = p(l_n = z_i|x[1:N], \mathcal{M})$$
$$\gamma_n(i) = \frac{\alpha_n(i) \beta_n(i)}{p(x[1:N]|\mathcal{M})}$$
$$i(n) = \arg \max_i \gamma_n(i)$$

Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen

$$p(x[1:N]|\mathcal{M}) = \sum_{\forall L} p(x[1:n]|L, \mathcal{M}) p(L|\mathcal{M})$$
$$p(x[1:n]|L, \mathcal{M}) = \prod_{n=1}^N p_e(x[n]|l_n)$$
$$p(L|\mathcal{M}) = p_i(l_1) \prod_{i=1}^{l-1} p_t(l_{i+1}|l_i)$$

- Problem: Summierung über alle Pfade
- $2 N l^N$ Multiplikationen

Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen

- Vorwärtskoeffizienten
$$\alpha_n(i) = p(x[1:n], l_n = z_i|\mathcal{M})$$
- Induktionsanfang
$$\alpha_1(i) = p_i(z_i) p_e(x[1]|z_i)$$
- Induktionsschritt (Summation über alle eingehenden Kanten)
$$\alpha_{n+1}(j) = p_e(x[n+1]|z_j) \sum_{i=1}^l \alpha_n(i) p_t(z_j|z_i)$$
- gesuchte Bewertung der Inputsequenz
$$p(x[1:N]|\mathcal{M}) = \sum_{i=1}^l \alpha_N(i)$$
- nur noch Summe über alle (End-)Zustände
- $l^2 N$ Multiplikationen im allgemeinen Fall
- $k l N$ Multiplikationen bei Beschränkung auf Bakis-Modelle

Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen

- VITERBI-Algorithmus
$$\delta_n(j) = p_e(x[n]|z_j) \max_i (\delta_{n-1}(i) p_t(z_j|z_i))$$
- Dynamische Programmierung
- Verwandtschaft zum Vorwärts-Algorithmus
- Suchraumbeschränkungen
 - Einbeziehung des slope-Constraints: nur die tatsächlichen Vorgänger / Nachfolger werden berücksichtigt
 - Beam-Search

Training von Hidden-Markov-Modellen

- Baum-Welch-Algorithmus
 - rekursive Verfeinerung der Schätzwerte
 - $\xi_n(i, j)$: Wahrscheinlichkeit für einen Übergang von z_i zu z_j bezüglich der Trainingssequenz

$$\xi_n(i, j) = p(l_i = z_i, l_{i+1} = z_j | x[1:M], \mathcal{M})$$

$$\xi_n(i, j) = \frac{\alpha_n(i) p_t(z_j | z_i) p_e(x[n+1] | z_j) \beta_{n+1}(j)}{p(x[1:M] | \mathcal{M})}$$

Training von Hidden-Markov-Modellen

- Neuschätzen der Modellparameter

$$\bar{p}_i(z_i) = \gamma_1(i)$$

$$\bar{p}_t(z_j | z_i) = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \xi_n(i, j)}{\sum_{n=1}^{N-1} \gamma_n(i)}$$

$$\bar{p}_e(x | z_i) = \frac{\left[\sum_{n=1}^N \gamma_n(i) \right]_{x[n]=x}}{\sum_{n=1}^N \gamma_n(i)}$$

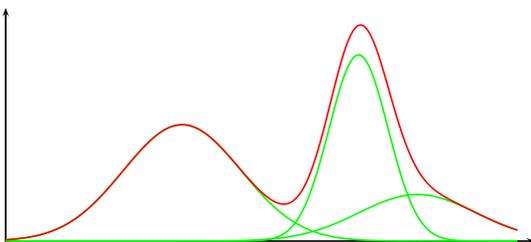
Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- kontinuierliche Mischverteilungen ((Gaussian) mixtures)
 - Konstruktion beliebiger Verteilungsdichten als Summe von elementaren Verteilungsdichten

$$p(x | z_i) = \sum_{m=1}^M c_m \mathcal{N}[x, \mu_m, \Sigma_m]$$



Worterkennung

- Klassifikation von atomaren Objekten
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Vektorquantisierung
- Klassifikation von Objektsequenzen
- Nichtlineare Zeitnormierung
- Hidden-Markov-Modellierung
- Erkennung mit Hidden-Markov-Modellen
- Training von Hidden-Markov-Modellen
- Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

Training von Hidden-Markov-Modellen

- Parameteranzahl pro Zustand:

$$p = t + k$$

mit t : Anzahl Transitionen pro Zustand, k : Kodebuchgröße

- mehrere Realisierungen pro Wort erforderlich
- Trainingsaufwand ist proportional zur Wortschatzgröße

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- Verwendung kontinuierlicher Wahrscheinlichkeitsdichten für die Emission

$$p(x | z_i) = \mathcal{N}[x, \mu_m, \Sigma_m]$$

- Vorteil: Vektorquantisierung entfällt (Quantisierungsfehler)
- Nachteile:
 - Festlegung auf einen Verteilungstyp
Diskrete Emissionswahrscheinlichkeiten können beliebige Verteilungstypen approximieren
 - hohe Anzahl an Verteilungsparametern pro Modell-Zustand:

$$p = t + n + n^2$$

mit n : Dimensionalität der Merkmalvektoren
→ mehr Trainingsdaten erforderlich

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- kontinuierliche Mischverteilungen
 - Vorteil: multimodale Modellierung von Sprache (Sprecherinvarianz)
 - Nachteil: noch größere Anzahl von zu schätzenden Parametern pro Modell-Zustand:

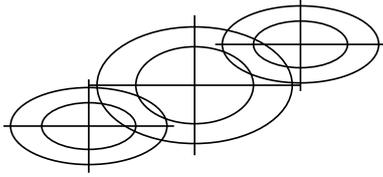
$$p = t + m(n + n^2)$$

mit m : Anzahl der Verteilungsmodi
→ noch mehr Trainingsdaten erforderlich

- Anzahl der Modi
 - uniform: gleich Anzahl pro Modellzustand
 - dynamisch: in Abhängigkeit von den Beobachtungen pro Zustand

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- Reduktion der Parameteranzahl durch Beschränkung auf die Diagonale der Kovarianzmatrix möglich
 - Korrelationen können durch Überlagerung verschiedener Moden approximiert werden.



- Parameteranzahl pro Zustand

$$p = t + 2mn$$

Worterkennung

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle 269

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- tied mixture models: Verwendung kontinuierlicher Verteilungen im Vektorquantisierer
- ebenfalls zweistufige Zuordnung: Modellzustand \mapsto diskretes Symbol \mapsto Verteilungsfunktion
- Verteilungsdichtefunktion statt Abstandsmaß

$$p(x|v_i) = \sum_{m=1}^M c_m \mathcal{N}[x, \mu_m, \Sigma_m]$$

- Verteilungsdichtefunktion eines Zustandes als gewichtete Summe der Verteilungsfunktionen für die emittierten Vektorklassen

$$p(x|z_i) = \sum_{k=1}^K p(x|v_k) p_e(v_k|z_i)$$

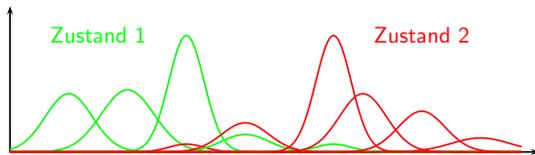
- gemeinsames Inventar von Verteilungen für alle Zustände
- HMM-Training schätzt nur noch die zustandsabhängigen Gewichtsfaktoren für die einzelnen Moden

Worterkennung

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle 271

Semi-kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- semi-kontinuierliche Verteilung



- Zahl der Vektorklassen $<$ Zahl der Modellzustände \rightarrow weniger Parameter zu trainieren

$$p = t + k(d + d^2)$$

- weitere Reduzierung: Summierung über die 2 ... 8 besten Vektorklassen pro Zustand reicht aus

Worterkennung

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle 273

Grundlagen der Sprachsignalerkennung

- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- Worterkennung
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

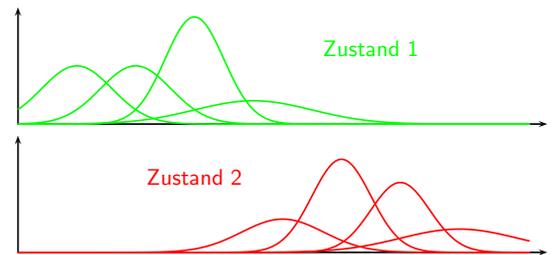
- Mischverteilungen ergeben einen zweistufigen stochastischen Prozess
 - Zustand \rightarrow Verteilung \rightarrow Merkmalsvektor
- welche Verteilung hat die Beobachtung erzeugt?
- Training erfordert ebenfalls EM Algorithmus
- Anzahl der Moden pro Zustand kann dynamisch in Abhängigkeit von der Anzahl der Beobachtungen variiert werden

Worterkennung

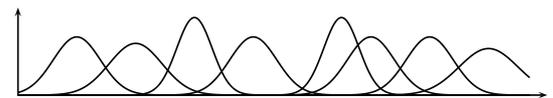
Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle 270

Semi-kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- kontinuierliche Mischverteilungen



- Kodebuch für semi-kontinuierliche Verteilungen



Worterkennung

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle 272

Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle

- diskrete und kontinuierliche Modelle sind Spezialfälle der semi-kontinuierlichen Hidden-Markov-Modelle:
 1. Grenzfall 1: alle Vektorklasse emittieren identische rotationssymmetrische Verteilungsfunktionen (Parameterverklebung/tying) \rightarrow diskretes HMM
 2. Grenzfall 2: Kodebuch wird so groß gewählt, daß jedem Modellzustand eine eigene Vektorklasse zugeordnet werden kann \rightarrow kontinuierliches HMM

Worterkennung

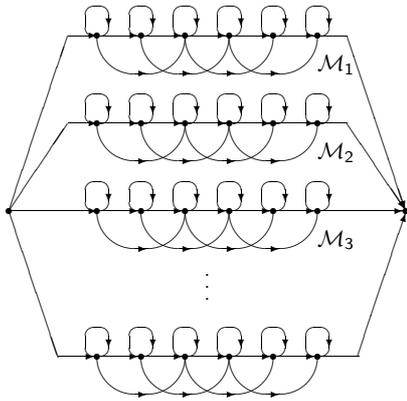
Kontinuierliche Hidden-Markov-Modelle 274

Phonbasierte Worterkennung

- Worterkennung bei großem Wortschatz
- Phonmodelle
- Kompositionelle Wortmodelle
- Modellierung der Koartikulation
- Parameterreduktion
- Wörterbucherweiterung

Worterkennung bei großem Wortschatz

- Worterkennung mit n Wortmodellen
 - Parallele Suche durch alle Wortmodelle



Phon-basierte Worterkennung

Worterkennung bei großem Wortschatz 277

Worterkennung bei großem Wortschatz

- individuelles Training der Wortmodelle
 - abhängig von der Wortschatzgröße
 - Beispiel: Diktiersystem mit 20000 Einheiten
 - 10 Realisierungen pro Wort
 - 100 ... 200 Stunden Training
 - sprecherabhängig!
- Suche nach praktikablen Wortuntereinheiten
 - Silben / Halbsilben
 - Phoncluster
 - Phone

Phon-basierte Worterkennung

Worterkennung bei großem Wortschatz 279

Phonmodelle

- Phone - kleinste segmentale Einheit zur Sprachbeschreibung
- Phoninventar
 - Vokale
 - Konsonanten
 - Wortpause
 - allphonische Varianten, insbesondere für die Plosive

Phon-basierte Worterkennung

Phonmodelle 281

Phonmodelle

- Phonspezifische Topologien
- Modifikation der Zustandsanzahl
 - Pausen und Frikative mit weniger Zuständen
 - Diphthonge mit mehr Zuständen
 → Verschlechterung der Erkennung
- Beseitigen nutzloser Knoten
 - Entfernen aller Kanten mit $p_t(i, j) = 0$
 - Entfernen aller nicht mehr erreichbarer Knoten
 - 5% Reduktion der Knotenzahl
 - 10% Reduktion der Kantenzahl
 - nur für ausreichend gut trainierte Modelle!

Phon-basierte Worterkennung

Phonmodelle 283

Worterkennung bei großem Wortschatz

- Erkennung
 - Vorwärtsalgorithmus

$$w = \arg \max_w p(x[1 : n] | \mathcal{M}_w)$$

- Viterbi-Algorithmus
 - nur auf isolierte Modelle anwenden
 - ermittelt den optimalen Pfad
 - nicht das optimale Modell

Phon-basierte Worterkennung

Worterkennung bei großem Wortschatz 278

Phonbasierte Worterkennung

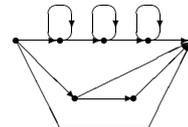
- Worterkennung bei großem Wortschatz
- Phonmodelle
- Kompositionelle Wortmodelle
- Modellierung der Koartikulation
- Parameterreduktion
- Wörterbucheinweitung

Phon-basierte Worterkennung

Phonmodelle 280

Phonmodelle

- mögliche Modellstruktur (LEE 89)



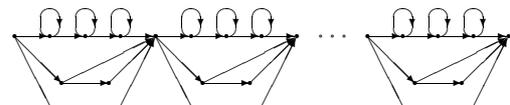
- hier: Emissionswahrscheinlichkeiten an den Kanten!

Phon-basierte Worterkennung

Phonmodelle 282

Phonmodelle

- Kopplung von Phonmodellen zu Wortmodellen



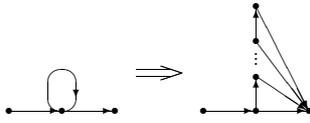
- beliebige Sequenzen aus Phonmodellen
 - sehr unsichere Erkennungsergebnisse: 60 ... 70%
 - Beschränkung auf die durch das Wörterbuch lizenzierten Phonsequenzen
 → Worterkennung auf der Basis von Wortuntereinheiten
- unrestringiert verkoppelte Phonmodelle: Modellierung unbekannter Wörter

Phon-basierte Worterkennung

Phonmodelle 284

Dauermodellierung

- Minimal- und Maximaldauern für Phoneme
- Semi-Markov-Modelle (RUSSELL 1985)
 - Schätzen der Verweildauer in den Zyklen (modifizierter Vorwärts-Rückwärts-Algorithmus)
 - Integration in die normale Viterbi-Suche
 - D neue Parameter pro Zustand (D maximale Zyklenzahl)
 - D^2 -fache Rechenzeit
 - D -facher Speicherbedarf



Phon-basierte Worterkennung

Phonmodelle 285

Phonbasierte Worterkennung

- Worterkennung bei großem Wortschatz
- Phonmodelle
- Kompositionelle Wortmodelle
- Modellierung der Koartikulation
- Parameterreduktion
- Wörterbucherweiterung

Phon-basierte Worterkennung

Kompositionelle Wortmodelle 287

Kompositionelle Wortmodelle

- Aussprachealternativen
 - Kombinatorik führt zu zahlreichen Wörterbucheinträgen
 - steigender Erkennungsaufwand
 - Verteilung von Wahrscheinlichkeitsmasse auf die Alternativen
 - Erkennungssicherheit sinkt

Phon-basierte Worterkennung

Kompositionelle Wortmodelle 289

Kompositionelle Wortmodelle

- Vereinfachung: Substitutionsfreie Netze
 - Substitutionen sind weniger kritisch: werden bereits durch die Emissionswahrscheinlichkeiten modelliert
 - Einfügungen und Weglassungen betreffen weniger Varianten: weniger Parameter
- Modelle mit optionalen Phonen
 - nur Weglassungen werden modelliert

Phon-basierte Worterkennung

Kompositionelle Wortmodelle 291

Dauermodellierung

- separate Verwaltung der Verweilwahrscheinlichkeiten (RABINER 1985)
 - z.B. als Postprozessor zur Wichtung von Pfaden
 - suboptimal
 - aber deutlich weniger Rechenaufwand
- Segment-Level-Integration (LEE 1989)
 - Komplexe Zustände mit variabler Länge
 - Übergangs- und Emissionswahrscheinlichkeiten werden erst beim Verlassen eines Zustandes berechnet
 - Multiplikation mit der Verweilwahrscheinlichkeit



Phon-basierte Worterkennung

Phonmodelle 286

Kompositionelle Wortmodelle

- Aussprachewörterbuch: Zuordnung von Phonsequenzen zu Wortformen
 - einfachster Fall: nur kanonische Aussprache pro Wortform
 - keine Berücksichtigung von Aussprachevarianten
 - Training erzwingt Zuordnung von Aussprachevarianten zu den Modellen
 - schwa-Ausfall im Wortauslaut: *lesn, hörn*
 - Aspiration von Plosiven im Wortauslaut: *Hut, Park*
 - Palatalisierung: *jut, abjegeben*
 - Dialektale Vokalfärbungen: sächs. *klar*, berl. *mein*
 - Lautreduktion bei Schnellsprache: *national*
- "verschmutzte" Phonmodelle

Phon-basierte Worterkennung

Kompositionelle Wortmodelle 288

Kompositionelle Wortmodelle

- Phonnetze
- manuelle Erarbeitung ist
 - aufwendig und unzuverlässig
- Konstruktion von Aussprachenetzen
 - ausgehend von der kanonischen Aussprache
 - Anwendung phonologische Regeln
- Vorteil: "saubere" Phonmodelle
- Probleme:
 - Viterbi-Algorithmus: Verteilung der Wahrscheinlichkeitsmasse auf zahlreiche alternative Pfade
 - Schätzen der Wahrscheinlichkeiten
 - Atlantik* mit 6912 Aussprachevarianten (LEE 1988)
 - nicht genügend Trainingsmaterial vorhanden

Phon-basierte Worterkennung

Kompositionelle Wortmodelle 290

Kompositionelle Wortmodelle

- kompositionelle Phone
 - besonders zur Modellierung der nichtstationären Laute (Plosive)
 - optionale Verschlusspause / obligate Verschlusslösung
 - optionale Verschlusspause / optionale Verschlusslösung
 - p_1 : nur Verschlusspause
 - p_2 : Verschlusspause und -lösung
 - p_3 : nur Verschlusslösung
 - $p_1 > p_2 > p_3$
- obligatorische Modifikationen
 - flapping
 - better* → *bedder*
- kompositionelle Modelle für die Affrikaten (/ts/)

Phon-basierte Worterkennung

Kompositionelle Wortmodelle 292

Phonbasierte Worterkennung

- Worterkennung bei großem Wortschatz
- Phonmodelle
- Kompositionelle Wortmodelle
- Modellierung der Koartikulation
- Parameterreduktion
- Wörterbucheinweitung

Modellierung der Koartikulation

- Wortabhängige Phonmodelle
 - Phonmodelle im Kontext des Wortes, in dem sie auftreten
 - sehr viele
 - aber interpolationsfähig
 - Nutzung von Parametern für besser trainierbare Modelle
 - z.B. Interpolation mit kontextunabhängigen Phonmodellen
- Wortschatz- und damit auch anwendungsspezifisch
- nur für häufige Wortformen praktikabel
 - funktionswortabhängige Phonmodelle

Modellierung der Koartikulation

- Clustern von Kontexten
 - datengetriebenes Ranking von Entscheidungsfragen (Expertenwissen)
 - aufgrund ihres Informationsgewinn
 - nach ihrem Einfluss auf die Erkennungsqualität
- nur die Zusammenfassungen mit geringen Auswirkungen werden berücksichtigt
- gemeinsames Training der Kontextklassen oder nachträgliches Mischen der Modelle

Phonbasierte Worterkennung

- Worterkennung bei großem Wortschatz
- Phonmodelle
- Kompositionelle Wortmodelle
- Modellierung der Koartikulation
- Parameterreduktion
- Wörterbucheinweitung

Modellierung der Koartikulation

- Phonbasierte Worterkennung: doppelte Fehlerrate gegenüber der Erkennung mit Ganzwortmodellen
- Ursache: Nichtbeachten der Koartikulation
 - physikalische Beschränkungen für die Bewegung der Artikulatoren
- alternative Wortuntereinheiten
- Silben / Halbsilben (Phonsequenzmodelle)
 - zu viele → Trainingsprobleme
- Diphone, Transitionsmodelle
 - zu viele → Trainingsprobleme

Modellierung der Koartikulation

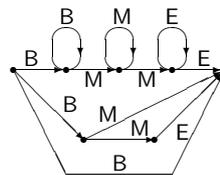
- kontextabhängige Phonmodelle ("Triphone")
 - Phonmodelle im Kontext ihrer unmittelbaren Nachbarphone
 - ebenfalls interpolationsfähig
 - Interpolation mit
 - links-kontextabhängigen Modellen
 - rechts-kontextabhängigen Modellen
 - kontextunabhängigen Modellen
 - Generalisierung: Polyphone, auch auf Graphembasis
 - Berücksichtigung des Kontexts in genau dem Maße, wie ausreichend Trainingsdaten zur Verfügung stehen
 - großer Speicheraufwand (24MByte)
 - keine Generalisierung über Kontextklassen
 - z.B. ist der Kontexteinfluss von stimmhaften und stimmlosen Plosiven im wesentlichen gleich

Modellierung der Koartikulation

Erkennungseinheit	Modellierung der Koartikulation	Trainierbarkeit	Interpolierbarkeit
Wortmodelle	gut	schlecht	unmöglich
Phonmodelle	schlecht	gut	unnötig
Phonsequenzmodelle	gut	schwierig	schlecht
Transitionsmodelle	gut	schwierig	schlecht
Wortabhängige Phonmodelle	gut	schwierig	gut
Kontextabhängige Phonmodelle	gut	schwierig	gut

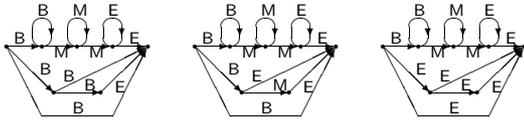
Parameterreduktion

- Tying (Verkleben)
 - Zusammenfassen von Emissionswahrscheinlichkeiten



Parameterreduktion

- Phonabhängiges Tying



- Vokale (a, e, o), Diphthonge, Frikative
- Vokale (schwa, i, u), initiale Konsonanten
- Plosive

- Vernachlässigung der Transitionswahrscheinlichkeiten (NEY 1993)
 - keine nennenswerte Verschlechterung der Erkennungsergebnisse

Phon-basierte Worterkennung

Parameterreduktion 301

Parameterreduktion

- deleted interpolation
 - Abtrennen eines für die λ -Schätzung benötigten Datenblocks (deleted data block)
 - zyklisches Austauschen des reservierten Datenblocks
 - erheblich höherer Trainingsaufwand
- Smoothing
 - untertrainierte Modelle enthalten viele Singularitäten
 - zufällig nie aufgetretene Beobachtungen
 - numerische Probleme
 - $p = 0$ bedeutet aber: Ereignis ist unmöglich!

Phon-basierte Worterkennung

Parameterreduktion 303

Phonbasierte Worterkennung

- Worterkennung bei großem Wortschatz
- Phonmodelle
- Kompositionelle Wortmodelle
- Modellierung der Koartikulation
- Parameterreduktion
- Wörterbucheintragung

Phon-basierte Worterkennung

Wörterbucheintragung 305

Grundlagen der Sprachsignalerkennung

- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- Worterkennung
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

Erkennung fließender Sprache

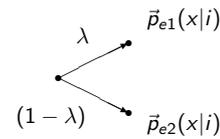
307

Parameterreduktion

- Interpolation
- Kombination zweier unabhängig ermittelter Verteilungen z.B. kontextunabhängige / kontextabhängige Phone

$$\vec{p}_e(x|i) = \lambda \vec{p}_{e1}(x|i) + (1 - \lambda) \vec{p}_{e2}(x|i)$$

- Schätzen von λ



auf der Basis von Daten, die noch nicht für die Berechnung von $\vec{p}_{e1}(x|i)$ und $\vec{p}_{e2}(x|i)$ verwendet wurden

- Ziel: gute Prädiktionsfähigkeit des interpolierten Modells für *neue* Beobachtungen

Phon-basierte Worterkennung

Parameterreduktion 302

Parameterreduktion

- Smoothing
 - Floor-Methode
 - jeder Parameter $p < \epsilon$ wird auf ϵ angehoben
 - Ausgleich der Wahrscheinlichkeiten erforderlich $\sum p_i = 1$
 - entspricht Interpolation mit einer Gleichverteilung
 - Abstandsmethode
 - ist die Emissionswahrscheinlichkeit für einen Prototypvektor $p_e(i) \approx 0$ und es gibt einen benachbarten Prototypvektor mit $p_e(i) \gg 0$ und gilt $d(i, j) < \epsilon$, so erfolgt ein Ausgleich
 - Co-occurrence-Methode
 - Ausgleich erfolgt vorrangig zwischen Prototypvektoren, die in gleichen Kontexten auftreten

Phon-basierte Worterkennung

Parameterreduktion 304

Wörterbucheintragung

- Wörterbucheintragungen erfordern Ergänzung des Aussprachewörterbuchs
- nur sinnvoll, wenn Systemreaktion auch problemlos definiert werden kann
 - Diktiermaschine
 - manuelle Eingabe einer orthographischen Repräsentation
 - Ermitteln der Normaussprache
 - Graphem-Phonem-Umsetzung aus der Schriftversion
 - manuelle Eingabe einer pseudophonetischen Umschrift: *Äktschn*

Phon-basierte Worterkennung

Wörterbucheintragung 306

Erkennung fließender Sprache

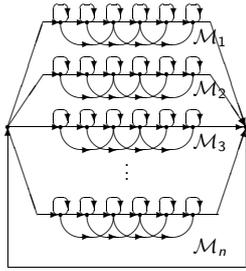
- Fließende Sprache
- Sprachmodelle
- Dialogmodelle
- Fehlermaße
- Training und Erkennung
- Behandlung unbekannter Wörter
- Sprecherunabhängigkeit

Erkennung fließender Sprache

308

Fließende Sprache

- Verbundene Sprache (connected speech)
 - Aneinanderreihung von wohlformulierten Wortformen
- unrestringierte Verkettung von Wortmodellen
 - Ganzwortmodelle oder phonbasierte Wortmodelle



Erkennung fließender Sprache

- fließende Sprache (continuous speech)
 - Koartikulation an Wortübergängen
 - Modellierung nur für phonbasierte Modelle realistisch (cross-word triphones)
 - Reduktion der Fehlerrate um 15 % (relativ) HUANG ET AL. 1990
 - aber Einfluss des Testmaterials: unterschiedliche Sprechstile haben unterschiedlichen Grad an Koartikulation

Sprachmodelle

- Modellierung der zulässigen bzw. typischen Wortsequenzen innerhalb des konkreten Anwendungsgebietes
- binärer Ansatz: formale Grammatik G

$$p(w[1 : n]) = \begin{cases} \text{const} \neq 0 & \text{für } w[1 : n] \in L(G) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$
 - Gleichverteilung für alle durch die Grammatik lizenzierten Wortformsequenzen
 - Approximation durch Wortpaar-Grammatik
 - Approximation für reguläre Grammatiken: dynamische Einschränkung der Wortschatzgröße auf die möglichen Nachfolger: Wortnetze

Sprachmodelle

- stochastische Modelle

$$p(x_1 \dots x_n) = p(x_1) \cdot p(x_2|x_1) \cdot p(x_3|x_1 x_2) \cdot \dots \cdot p(x_n|x_1 \dots x_{n-1})$$
- Approximation durch (Unigram-) / Bigram- / Trigram-Statistiken

$$p(x_1 \dots x_n) \approx p(x_1) \cdot p(x_2|x_1) \cdot p(x_3|x_2) \cdot \dots \cdot p(x_n|x_{n-1})$$
 - $(m,)$ m^2 bzw. m^3 Parameter (mit m : Wortschatzgröße)
 - wachsender Speicherbedarf
 - zunehmende Datenknappheit
 - Spezialfall: Bigram-Statistik mit Gleichverteilung: Wortpaargrammatik
- bei großem Wortschatz auch kategorienbasierte n-gram-Statistiken
 - Clustering oder
 - automatisches Tagging
- stochastische Phrasenstrukturgrammatiken
 - Modellierung längerer Abhängigkeiten

Erkennung fließender Sprache

- Entscheidung über Wortsequenzen, nicht Einzelwörter
 - variable *a priori*-Wahrscheinlichkeiten für Wortformen

$$p(w|x) = \frac{p(x|w) p(w)}{p(x)}$$

$p(w)$ ist kontextabhängig

- unterschiedliche *a priori*-Wahrscheinlichkeiten für Wortformsequenzen

$$p(w[1 : n]|x) = \frac{p(x|w[1 : n]) p(w[1 : n])}{p(x)}$$

$$w = \arg \max_w p(x|w[1 : n]) p(w[1 : n])$$

Erkennung fließender Sprache

- Fließende Sprache
- Sprachmodelle
- Fehlermaße
- Dialogmodelle
- Training und Erkennung
- Behandlung unbekannter Wörter
- Sprecherunabhängigkeit

Sprachmodelle

- dynamische Beschränkung des aktuellen Wortschatzes
- statischer Verzweigungsfaktor b

$$b = \frac{e}{n - n_f}$$

e Anzahl der Transitionen
 n Anzahl der Zustände
 n_f Anzahl der Endzustände

beschreibt die restriktive Kapazität der Grammatik

- reguläre Grammatiken erlauben keine (beschreibungs-) adäquate Modellierung für die Syntax natürlicher Sprache
 - Ableitung aus einer kontextfreien (Unifikations-) Grammatik
 - "obere" Approximation $L(G_{reg}) \supset L(G_{cf})$

Sprachmodelle

- Beispiele für Markov-Ketten
 - Unigramme (0. Ordnung) $p(s_i)$

aiobnin*tarsfneonlpiitdregedcoa*ds*e*dbieastnreleucdkeaitb*
 dnurlarls*omn*keu**svdleeeioeie* ...
 - Bigramme (1.Ordnung) $p(s_i|s_{i-1})$

er*agepteprteingeit*gerelen*re*unk*ves*mtterone*hin*d*an*
 nzerurbom* ...
 - Trigramme (2.Ordnung) $p(s_i|s_{i-1}s_{i-2})$

billunten*zugen*die*hin*se*sch*wel*war*gen*man*nicheleblant*
 diertunderstim* ...
 - Quadrogramme (3. Ordnung) $p(s_i|s_{i-1}s_{i-2}s_{i-3})$

eist*des*nich*in*den*plassen*kann*tragen*was*wiese*zufahr*
 ...

Perplexität

- Systeme mit Sprachmodell sind nicht mehr ohne weiteres vergleichbar
→ Maß für die restriktive Kraft eines Sprachmodells erforderlich
- Sprachmodell beschreibt einen stochastischen Prozeß zur Spracherzeugung
- Entropie H (in bit) ist ein Maß für den Informationsgehalt einer stochastischen Quelle (aus der Sicht des Empfängers)
 - $H(S)$ entspricht dem mittleren (minimalen) Kodieraufwand für die Symbole einer Quelle
 - Perplexität ist mittlere Mehrdeutigkeit der Quelle

$$Q(S) = 2^{H(S)}$$

- Informationsgehalt eines stochastischen Ereignisses

$$I(w) = \log_2 \frac{1}{p(w)}$$

Perplexität

- Testkorpusperplexität (nach JELINEK 1975)
 - wenn Berechnung über Grammatik nicht möglich
- Testkorpus als stochastische Quelle

$$H(S) = - \sum_w p(w) \log_2 p(w)$$

$$H(S) = - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{w[1:n]} p(w[1:n]) \log_2 p(w[1:n])$$

Test: für unabhängige Ereignisse gilt ("it can be easily checked")

$$p(w[1:n]) = p(w_1) \cdot p(w_2) \cdot \dots \cdot p(w_n)$$

Perplexität

- Approximation der Wahrscheinlichkeit für das Testkorpus über eine Bigram(-Trigram)-Statistik
- Satzgrenzemarkierungen s gelten als eigenständige Wortformen

$$p(w[1:n]) \approx p(w_1|s)p(w_2|w_1)p(w_3|w_2) \dots p(s|w_n)$$

- untere Approximation für die Wahrscheinlichkeit
- obere Approximation für die Entropie / Perplexität

Sprachmodelle

- die überwiegende Zahl von n-grammen wird im Training nie gesehen
→ Backoff-Modelle
trigram → bigram → unigram
- lange Abhängigkeiten werden durch n-gramme nicht erfasst
 - distance bigrams: $p(w_n|w_{n-d-1})$
 - für Klassen und Wörter
 - Kombination mit n-gram durch (log-)lineare Interpolation
- stochastische CFG-Parser
 - Berechnung von Präfix-Wahrscheinlichkeiten
 - lexikalisierte Modelle
 - Modellierung der Kopfabhängigkeiten (exposed head word)
 $p(w|w_{\text{exposed head}})$

Perplexität

- Entropie einer Quelle S , die Symbole $w \in W$ emittiert

$$\begin{aligned} H(S) &= \sum_w p(w) I(w) \\ &= \sum_w p(w) \log_2 \frac{1}{p(w)} \\ &= - \sum_w p(w) \log_2 p(w) \end{aligned}$$

- Perplexität: "Mehrdeutigkeit" einer Quelle

$$Q(S) = 2^{H(S)}$$

Perplexität

- für ergodische Quellen kann gezeigt werden, dass

$$H(S) = - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log_2 p(w[1:n])$$

→ Entropie kann auf der Basis einer hinreichend langen Wortsequenz $T = w[1:n]$ geschätzt werden ($n \rightarrow \infty$)

$$H(T) = - \frac{1}{n} \log_2 p(w[1:n])$$

$$\begin{aligned} Q(T) &= 2^{H(T)} \\ &= p(w[1:n])^{-\frac{1}{n}} \end{aligned}$$

Perplexität

- Beispielperplexitäten

Aufgabe / System	Wortschatz	Wortpaar-grammatik	Bigram-modell	Trigram-modell
HARPY	1011	4.5		
RM	997	60	20	
ATIS	1401		20	
WSJ	5000		113	147
VM	3000		85	
Switchboard				68
Broadcast News				217

- Faustregel: $Q/10 \rightarrow$ Fehlerrate/2

Erkennung fließender Sprache

- Fließende Sprache
- Sprachmodelle
- Fehlermaße
- Dialogmodelle
- Training und Erkennung
- Behandlung unbekannter Wörter
- Sprecherunabhängigkeit

Fehlermaße

- Satzerkennungsrate
 - oftmals recht klein
 - abhängig von der mittleren Satzlänge
 - schlechte Vergleichbarkeit unterschiedlicher Lösungsansätze
- Generalisierung der Worterkennungsrate auch für Wortsequenzen
- Probleme mit der Behandlung von Einfügungen und Weglassungen
 - Sind Einfügungen Erkennungsfehler?
 - *recognize* → *wreck a nice* = 3 Fehler?
 - Zuordnung der fehlerhaften Wortkette zur korrekten

```

A B C      A B C
 | |      |
A C      A  C
2 Fehler   1 Fehler
    
```

→ Suche nach einer optimalen Zuordnung (minimale Fehleranzahl)

Fehlermaße

- Wortkettenzuordnung
 - elementare Wortpaarzuordnungen
 - Identität (I)
 - Substitution (S)
 - Einfügung (E)
 - Weglassung (W)

Fehlermaße

- Distanzmaß für elementare Wortpaarzuordnungen
- LEVENSTEIN-Metrik
 - Identität 0
 - sonst 1
- Einschränkungen für die Fehlerkombinierbarkeit (z.B. W S = S W)
- ermitteln der optimalen Zuordnung durch dynamische Programmierung
 - A B C D E F
 - I W I W I S E
 - A C E G H
- Normierung der Fehlermaße auf die Länge L der (korrekten) Referenzkette

Fehlermaße

- Korrektheit (correctness in %)

$$K = \frac{I}{L}$$

- Fehlerrate (error rate in %)

$$F = \frac{S + E + W}{L}$$

Fehlerrate kann größer als 100% sein

- Genauigkeit (accuracy in %)

$$G = 1 - F = \frac{I - E}{L} \quad \text{wegen } L = I + S + W$$

Fehlermaße

- Beispiele für Erkennungsraten

System	Jahr	Sprecher-	Wortsch.	Perpl.	K	G
HARPY	1978	abhängig	1011	4.5	97%	
BYBLOS	1987	abhängig	997	60	94.8%	92.5%
BYBLOS	1987	abhängig	997	997	70.1%	67.6%
SPHINX	1988	unabh.	997	20	96.2%	95.8%
SPHINX	1988	unabh.	997	60	94.7%	93.7%
SPHINX	1988	unabh.	997	997	73.6%	70.6%
Philips	1992	abhängig	997	997	95.0%	92.3%
Philips	1993	abhängig	12 073	42	91.3%	87.9%
		
			15 188	267	96.6%	94.3%
VM	1995	unabh.	3000	75		72%
VM	2000	spontan	10000	87		75%

Erkennung fließender Sprache

- Fließende Sprache
- Sprachmodelle
- Fehlermaße
- Dialogmodelle
- Training und Erkennung
- Behandlung unbekannter Wörter
- Sprecherunabhängigkeit

Dialogsysteme

- Typischer Einsatzfall: Füllen von Slots in einer Informationsstruktur
 - Bestellungen, Reservierungen, Auskünfte
- pragmatische Annahmen
 - Nutzer ist an einer Problemlösung interessiert
 - Nutzer ist kooperativ
 - Nutzer ist Muttersprachler
- Designaufgabe unter Einbeziehung potentieller Nutzer
 - Wizard-of-Oz-Experimente
 - Prototyping
 - nutzerbezogene Evaluation (Dialogerfolgsrate)

Ergonomische Designkriterien

- Flexibilität und Liberalität
 - maximalen Formulierungsspielraum für den Nutzer anstreben
- Verhandlungsmöglichkeiten:
 - Nutzer kann Vorschläge des Systems annehmen oder ablehnen
 - Nutzer kann Constraints im Problemraum zurücknehmen
- Navigationsfähigkeit
 - System muss Veränderungen in der aktuellen Zielstellung erkennen können
 - Fragen zum Leistungsumfang des Systems müssen möglich sein

Ergonomische Designkriterien

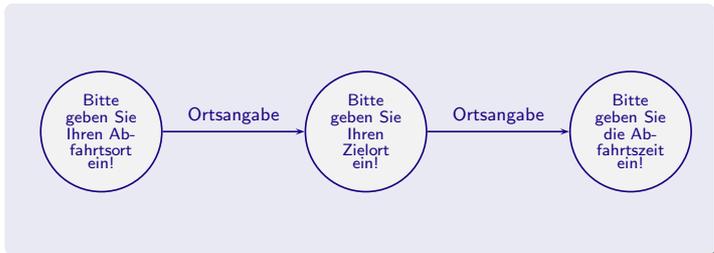
- Verteilung der Initiative:
 - systemgesteuerter (geschlossener) Dialog
 - Nutzer beantwortet Fragen nach strikt vorgegebenem Schema ("Verhör")
 - Dialog mit verteilter Initiative (mixed-initiative, offener Dialog)
 - Nutzer kann die Initiative ergreifen
 - (relativ) freie Spracheingabe
 - stark komprimierte Nutzeranfragen
 - barge in: Unterbrechen des Systems
 - Mischformen
 - z.B. Initiative im allgemeinen Fall beim Nutzer, System übernimmt bei erkennbaren Problemen die Steuerung

Geschlossene Dialoge

- Prädiktion möglicher (zulässiger) Nutzerreaktionen → temporäre Reduzierung des Wortschatzes
- Modellierung durch endliche Automaten
 - Dialogzustände: Aktionen, z.B. Aufforderung zur Eingabe (Prompt)
 - Übergänge zwischen Dialogzuständen: Erkennung von Nutzeräußerungen
- Beispiel: VoiceXML

Dialogmodellierung

- Mehrfachverwendung von Teilnetzen



VoiceXML

- Abspielen von Audiosamples

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<vxml version="2.0" lang="en">
<form>
  <block>
    <prompt bargein="false">Welcome to Travel Planner!
      <audio src="http://www.adline.com/mobile?code=12s4"/>
    </prompt>
  </block>
</form>
</vxml>
```

Ergonomische Designkriterien

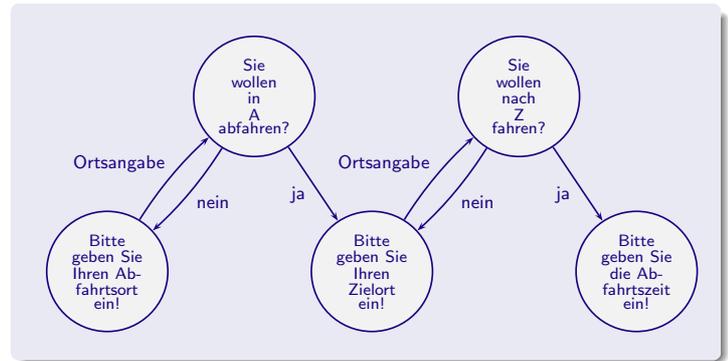
- Kontakt mit dem Nutzer
 - ständig Orientierung über Dialogzustand und Systemannahmen gewährleisten
 - direkte Antworten geben
 - Bestätigung von Erkennungsergebnissen bei geringer Konfidenz
 - Klärungsdialoge
 - Entscheidung über Abbruch → Weiterleitung an den Operator

Dialogmodellierung



Dialogmodellierung

- Erhöhen der Zuverlässigkeit durch Rückfragen



VoiceXML

- akustisches Auswahlmenü

```
<?xml version="1.0"?>
<vxml version="2.0">
<menu>
  <prompt>
    Say one of: <enumerate/>
  </prompt>
  <choice next="http://www.sports.example/start.vxml">
    Sports
  </choice>
  <choice next="http://www.weather.example/intro.vxml">
    Weather
  </choice>
  <choice next="http://www.news.example/news.vxml">
    News
  </choice>
  <noinput>Please say one of <enumerate/></noinput>
</menu>
</vxml>
```

- Dialogbeispiel

System: Say one of: Sports; Weather; News.
 Human: Astrology
 System: I did not understand what you said.
 (a platform-specific default message.)
 System: Say one of: Sports; Weather; News.
 Human: Sports
 System: proceeds to `http://www.sports.example/start.vxml`

- Forms: Slotstrukturen, die mit Werten zu füllen sind

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<vxml version="2.0" lang="en">
<form>
  <field name="city">
    <prompt>Where do you want to travel to?</prompt>
    <option>London</option>
    <option>Paris</option>
    <option>Stockholm</option>
  </field>
  <field name="travellers" type="number">
    <prompt>
      How many persons are travelling to <value expr="city"/>?
    </prompt>
  </field>
</block>
<submit next="http://localhost/handler"
  namelist="city travellers"/>
</block>
</form>
</vxml>
```

- Variation von Systemprompts bei Wiederholung

```
<field name="travellers" type="number">
  <prompt count="1">
    How many are travelling to <value expr="city"/>?
  </prompt>
  <prompt count="2">
    Please tell me the number of people travelling.
  </prompt>
  <prompt count="3">
    To book a flight, you must tell me the number
    of people travelling to <value expr="city"/>.
  </prompt>
  <nomatch>
    <prompt>Please say just a number.</prompt>
  </nomatch>
</field>
```

- Werteüberprüfung

```
<field name="travellers" type="number">
  <prompt>
    How many are travelling to <value expr="city"/>?
  </prompt>

  <filled>
    <var name="num_travellers" expr="travellers + 0"/>
    <if cond="num_travellers > 12">
      <prompt>
        Sorry, we only handle groups of up to 12 people.
      </prompt>
      <clear namelist="travellers"/>
    </if>
  </filled>

</field>
```

- Auswertung von Konfidenzwerten

```
<field name="city">
  <prompt>Which city?</prompt>
  ...
  <filled>
    <if cond="city$.confidence < 0.3">
      <prompt>Sorry, I didn't get that</prompt>
      <clear namelist="city"/>
    <elseif cond="city$.confidence < 0.7"/>
      <assign name="utterance" expr="city$.utterance"/>
      <goto nextitem="confirmcity"/>
    </if>
  </filled>
</field>
<subdialog name="confirmcity" src="#ynconfirm" cond="false">
  <param name="user_input" expr="utterance"/>
  <filled>
    <if cond="confirmcity.result=='false'">
      <clear namelist="city"/>
    </if>
  </filled>
</subdialog>
```

- Einbinden externer Grammatiken

```
<form name="trader">

  <field name="company">
    <prompt>
      Which company do you want to trade?
    </prompt>
    <grammar src="trade.xml#company"
      type="application/grammar+xml"/>
  </field>

  <field name="action">
    <prompt>
      do you want to buy or sell shares in
      <value expr="company"/>?
    </prompt>
    <grammar src="trade.xml#action"
      type="application/grammar+xml"/>
  </field>
</form>
```

- CF-Grammatiken, Regelimport

```
<grammar xml:lang="en">
  <import uri="http://please.com/politeness.xml"
    name="polite"/>
  <rule name="command" scope="public">
    <ruleref import="polite#startPolite"/>
    <ruleref uri="#action"/>
    <ruleref uri="#object"/>
    <ruleref import="polite#endPolite"/>
  </rule>
  <rule name="action" scope="public">
    <choice>
      <item tag="buy"> buy </item>
      <item tag="sell"> sell </item>
    </choice>
  </rule>
  <rule name="company" scope="public">
    <choice>
      <item tag="ericsson"> ericsson </item>
      <item tag="nokia"> nokia </item>
    </choice>
  </rule>
```

- Übergang zu einfacheren Dialogkonstrukten im Problemfall

```
<form name="trader">
  <grammar src="trade.xml#command"
    type="application/grammar+xml"/>
  <initial name="start">
    <prompt>What trade do you want to make?</prompt>
    <nomatch count="1">
      <prompt>
        Please say something like 'buy ericsson';
      </prompt>
      <reprompt/>
    </nomatch>
    <nomatch count="2">
      Sorry, I didn't understand your request.
      Let's try something simpler.
      <assign name="start" expr="true"/>
    </nomatch>
  </initial>
  <field name="company"> ... </field>
  <field name="action"> ... </field>
</form>
```

Offene Dialoge

- Analysefähigkeit statt Prädiktion
 - robuste Verarbeitung
- Erkennung des Dialogzustands
 - Aktivierung spezifischer Sprachmodelle
- Dialoggedächtnis
 - Detektion von Inkonsistenzen → Klärungsdialoge
- unerwartete Übernahme der Initiative durch den Nutzer (barge in)
 - Hauptgrund: Langatmigkeit von Systemprompts
 - technische Reaktion
 - Echounterdrückung einschalten
 - Sprachsynthese ausblenden
 - Dialogzustand mit maximaler Erwartung einnehmen

Erkennung fließender Sprache

Dialogmodelle 349

Training

- Initialisierung der Phonmodelle
- Vortrainieren der Phonmodelle
 - Sprachsignal in Lautabschnitte segmentiert
 - Zuordnung von Phonsymbolen zu den Lautsegmenten
 - auch Bootstrapping: segmentieren mit schlechten Modellen, dann neu trainieren
- Training der Phonmodelle
 - unsegmentiertes Sprachsignal
 - Zuordnung einer Wortkette zum Sprachsignal
 - Verkettung der Phonmodelle zu Wortmodellen
 - Verkettung der Wortmodelle zu einem Gesamtmodell für das Trainingsmaterial
 - BAUM-WELCH-Training
 - beste Zuordnung der Wortgrenzen wird automatisch gefunden

Erkennung fließender Sprache

Training und Erkennung 351

Erkennung

- Suchraumeinschränkungen
 - beam search
 - Schwellwert für die Abweichung von der (momentan) wahrscheinlichsten Lösung
 - 80 - 90% des Suchraums kann unberücksichtigt bleiben, ohne Qualitätsverlust
 - level building
 - zuerst Ermitteln der besten Worthypothesen pro Zeitframe
 - Erweitern der Hypothesen auf 2, 3, ... Wortformen entsprechend den Restriktionen der Grammatik
 - nicht zeitsynchron

Erkennung fließender Sprache

Training und Erkennung 353

Erkennung

- Ausbalancieren von akustischen und Sprachmodellen
- akustische Modelle sind unterbewertet
 - Übergang im Wort:

$$p(x[1 : t - 1]) \cdot p_t(z_t | z_{t-1}) \cdot p_e(x | z_t)$$

- Übergang zwischen zwei Wörtern:

$$p(x[1 : t - 1]) \cdot p_t(w_i | w_{i-1})$$

- Faktor m zur Anpassung der unterschiedlichen Modellwahrscheinlichkeiten:

$$p(x[1 : t - 1]) \cdot p_t(w_i | w_{i-1})^m$$

Strafmaß für das Verlassen eines Wortmodells

Erkennung fließender Sprache

Training und Erkennung 355

Erkennung fließender Sprache

- Fließende Sprache
- Sprachmodelle
- Fehlermaße
- Dialogmodelle
- Training und Erkennung
- Behandlung unbekannter Wörter
- Sprecherunabhängigkeit

Erkennung fließender Sprache

Training und Erkennung 350

Erkennung

- Wortgrenzen sind unbekannt: jedes Wort kann überall beginnen
- VITERBI-Annahme: Übergang im Markov-Modell erfolgt immer zu einem Knoten mit einem höheren Index
 - durch rekursive Verkopplung der Wortmodelle nicht mehr gültig
 - gesonderte Behandlung der Wortübergänge
 - → time-synchroneous VITERBI

Erkennung fließender Sprache

Training und Erkennung 352

Erkennung

- Suchprobleme
 - VITERBI-Algorithmus ermittelt den optimalen Pfad, nicht die optimale Wortsequenz (nur Approximation)
- Alternative: stack decoding
 - wortweise links-rechts-Erweiterung von Pfaden (auf dem Stack)
 - dadurch eindeutige Vergangenheit jeder temporären Lösung garantiert
 - Entfaltung des Suchraums (Graph) als Baum
 - Probleme
 - finden einer geeigneten Pfadbewertung, die die Hypothesenmenge auf dem Stack wirksam genug einschränkt
 - Normierung der Bewertung auf die Pfadlänge (Pfade sind unterschiedlich lang)

Erkennung fließender Sprache

Training und Erkennung 354

Erkennung fließender Sprache

- Fließende Sprache
- Sprachmodelle
- Fehlermaße
- Dialogmodelle
- Training und Erkennung
- Behandlung unbekannter Wörter
- Sprecherunabhängigkeit

Erkennung fließender Sprache

Behandlung unbekannter Wörter 356

Behandlung unbekannter Wörter

- jedes endliche Wörterbuch ist unvollständig
- Viterbi-Suche zwingt aber zur Interpretation jedes Signalabschnitts durch ein Modell
 - sinnlose und unvorhersehbare Zuordnungen bei der Verwendung unbekannter Wortformen
- HMM's für unbekannte Wörter
 - Ziel: hohe *a posteriori* Wahrscheinlichkeit $p(w|x)$ für unbekannte Wortformen $w \notin L$
 - niedriges $p(w|x)$ für alle $w \in L$

Erkennung fließender Sprache

Behandlung unbekannter Wörter 357

Erkennung fließender Sprache

- Fließende Sprache
- Sprachmodelle
- Fehlermaße
- Dialogmodelle
- Training und Erkennung
- Behandlung unbekannter Wörter
- Sprecherunabhängigkeit

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 359

Sprecherunabhängigkeit

- Sprechervarianz
- Sprecherunabhängige akustische Modelle
- Sprecherselektion
- Sprecheradaptation

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 361

Sprecherunabhängige akustische Modelle

- Verwendung multipler Kodebücher
 - Unterteilung der Merkmalsvektoren in n Abschnitte
 - LPC-Koeffizienten
 - Δ -LPC-Koeffizienten
 - Energie und Δ -Energie
 - separate Vektorquantisierung für die einzelnen Abschnitte
 - Annahme: die Emission der Vektorabschnitte ist unabhängig
→ Emissionswahrscheinlichkeit berechnet sich aus dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten
 - Vorteile
 - Reduktion des Quantisierungsfehlers
 - m^n Vektorkombinationen bei $m \cdot n$ Parametern
→ erheblicher Zuwachs an Dynamikumfang bei moderat erhöhter Parameterzahl
 - Multiplikation von n relativ flachen Emissionsverteilungen
→ Kontrastverschärfung

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 363

Behandlung unbekannter Wörter

- Kopplung von Phonmodellen (ASADI, SCHWARTZ UND MAKHOUL 1991)
 1. beliebige Sequenz aus 5 Phonen
 2. beliebige Sequenz aus mindestens 3 Phonen
 3. beliebige Sequenz aus mindestens 5 Phonen
 4. beliebige Sequenz von links-kontextsensitiven Phonen
2. ist beste Variante
- experimentelle Resultate
 - Erkennung 74%
 - Fehlalarm 3.4%
 - bei Grammatik mit Perplexität $Q = 100$
- auch: explizite Modellierung der phonotaktischen Regularitäten
- auch: Verkopplung der Modelle nach Triphonstatistik

Erkennung fließender Sprache

Behandlung unbekannter Wörter 358

Sprechervarianz

- individuelle Besonderheiten der Stimmlippen
 - Grundfrequenz
- anatomische Parameter des Vokaltrakts
 - Spektrale Lautcharakteristika (Formanten, Antiformanten)
- Sprechtempo
- Dialekt
- intraindividuelle Varianz: sprachliche Fitness
- Fehlerrate erhöht sich um Faktor 3 ... 5

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 360

Sprecherunabhängige akustische Modelle

- multiple Sprecher vs. Sprecherunabhängigkeit
 - multiple Sprecher: Testsprecher = Trainingssprecher
 - sprecherunabhängig: Testsprecher \neq Trainingssprecher
- Training robuster Modelle
 - Training eines Modells mit den Sprachdaten verschiedener Sprecher
 - flache Emissionsverteilungen
 - Daten von mehreren Sprechern → viele Daten

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 362

Sprecherselektion

- Einteilung der Sprecher in Cluster
 - Extremfall: jeweils nur ein Sprecher pro Cluster
- Clusterspezifische Modelle
 - Kodebücher der Vektorquantisierung
 - Emissionswahrscheinlichkeiten
 - Transitionswahrscheinlichkeiten
- Clustern von stochastischen Modellen
 - Iteration
 - paarweises Mischen der Modellparameter
 - Messen des Entropieverlustes
 - Zusammenfassen der beiden Modelle mit dem geringsten Entropieverlust
 - Vereinfachung: Ignorieren der Transitionswahrscheinlichkeiten
 - Paarweiser Elementeaustausch, solange dies zu einer Entropieerhöhung führt
- Anzahl der Cluster ist durch die verfügbaren Trainingsdaten begrenzt

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 364

Sprecherselektion

- Abhängigkeit der Sprecherclusterung vom Geschlecht der Sprecher (LEE 1989)

7	M	10	6	0	0	26	20	13
	F	2	1	7	20	0	0	0
6	M	10	6	0	26	20	13	
	F	2	1	27	0	0	0	
5	M	10	0	27	21	17		
	F	2	27	0	0	1		
4	M	10	0	23	42			
	F	2	27	0	1			
3	M	0	33	42				
	F	28	1	1				
2	M	0	75					
	F	30	0					

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 365

Sprecheradaption

- individuelle Modifikation eines sprecherunabhängigen Modells
 - offline: separate Trainingsdaten zur Adaption
 - überwachtes Training
→ sprecherabhängige aber stark untertrainierte Modelle
 - nach 10 ... 30 Sätzen 3 ... 5 % höhere Erkennungsrate
 - offline: Berechnung einer Abbildungsvorschrift aus dem Langzeitspektrum eines Sprechers
 - Transformation des Merkmalsraums
 - online: Nachführung während der laufenden Erkennung
 - nichtüberwachtes Training

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 367

Systemarchitekturen

- Sprachverstehende Systeme
- Monolithische Systeme
- Modulare Systemarchitekturen
- Bimodale Spracherkennung

Systemarchitekturen

Sprachverstehende Systeme 369

Systemarchitekturen

- Sprachverstehende Systeme
- Monolithische Systeme
- Modulare Systemarchitekturen
- Bimodale Spracherkennung

Systemarchitekturen

Monolithische Systeme 371

Sprecherselektion

- Sprecheridentifikation
 - mit vereinbarter Identifikationsäußerung (Testsatz mit zugehöriger Wortkette)
 - pro Sprechercluster: Bilden eines Modells für die Wortkette
 - Berechnen der Vorwärtswahrscheinlichkeit für jedes Sprechercluster
 - Maximumselektion
 - ohne vereinbarte Identifikationsäußerung
 - Erkennen der ersten Äußerung mit sprecherunabhängigen Modellen
 - Bestätigen einer korrekten Erkennung
 - manuelle Korrektur einer fehlerhaften Erkennung
- LEE 1989: kaum Verbesserung gegenüber sprecherunabhängigen Modellen

Erkennung fließender Sprache

Sprecherunabhängigkeit 366

Grundlagen der Sprachsignalerkennung

- Spracherkennung als technisches und akademisches Problem
- Sprachsignal: Erzeugung, Wahrnehmung und Beschreibung
- Merkmalsextraktion
- Worterkennung
- Phon-basierte Worterkennung
- Erkennung fließender Sprache
- Systemarchitekturen

Systemarchitekturen

368

Sprachverstehende Systeme

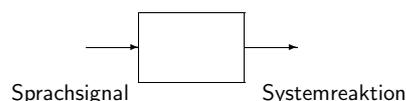
- Wortkette ist nur im Ausnahmefall Endresultat der Verarbeitung gesprochener Sprache
 - Diktiergerät
- meist inhaltliche Interpretation gewünscht:
 - Zugriff zu Informationssystemen
 - Zugriff zu technischen Gerätesteuern
 - Dolmetschen
- syntaktisch-semantische Analyse erforderlich
 - Analyse bei Erkennungsunsicherheit
 - Korrekturmechanismen
 - Verwaltung alternativer Hypothesen
 - unterspezifizierte Erkennungsergebnisse

Systemarchitekturen

Sprachverstehende Systeme 370

Monolithische Systeme

- unmittelbare Abbildung Sprachsignal → Systemreaktion



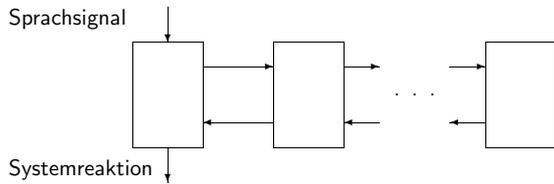
- Einzelworterkennung
 - eindeutige Zuordnung von Systemreaktionen zu Wortformen
 - direkte semantische Interpretation
→ nur für atomare Systemreaktionen (Kommandointerpreter)
- Strukturierte Beschreibungen der gewünschten Systemreaktion
 - Datenbankquery
 - Steuerprozeduren (z.B. Werkzeugmaschine, Roboter)
→ Lernen der Datenbankabfrage ???

Systemarchitekturen

Monolithische Systeme 372

Monolithische Systeme

- kaskadierte Architekturen



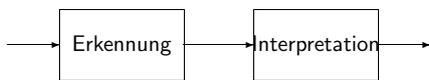
- Umsetzung erfolgt immer noch in einem Schritt

Systemarchitekturen

- Sprachverstehende Systeme
- Monolithische Systeme
- Modulare Systemarchitekturen
- Bimodale Spracherkennung

Modulare Systemarchitekturen

- sequentielle Architekturen mit *feed forward*-Schnittstellen
- zweistufig: Erkennung → Interpretation

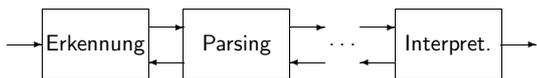


- mehrstufig:



Modulare Systemarchitekturen

- Sprachverstehen ist ein erwartungsgesteuerter Prozeß
- sequentielle Architekturen mit bidirektionaler Interaktion



- Probleme:
 - Kombinatorik über mehrere Ebenen hinweg
 - Prosodie
 - Semantik
 - Domänenmodellierung
 - Dialogmodellierung
 - flexible Wahl der Erkennungseinheiten

Systemarchitekturen

- Sprachverstehende Systeme
- Monolithische Systeme
- Modulare Systemarchitekturen
- Bimodale Spracherkennung

Modulare Systemarchitekturen

- Problem: Erkennungsunsicherheit
 - Übergabe der besten Wortkette
 - Übergabe der *n* besten Wortketten
 - heuristische Selektion
- Wortgraphen
 - erweitertes Chart-Parsing

Modulare Systemarchitekturen

- vernetzte Architekturen
 - Blackboard-Architektur
 - Hearsay-II (REDDY ET AL. 1973)
 - Engpaß: zentraler Scheduler
- dezentrale Architekturen

Bimodale Spracherkennung