Sonderforschungsbereich 378
Ressourcenadaptive kognitive Prozesse

KI-Labor am Lehrstuhl für Informatik IV

Leitung: Prof. Dr. W. Wahlster

Universität des Saarlandes
FB 14 Informatik IV
Postfach 151150
D-66041 Saarbrücken
Germany

Tel. 0681 / 302-2363

Bericht Nr. 143

SFB 378: Ressourcenadaptive Kognitive Prozesse

Wolfgang Wahlster, Werner Tack

April 1998

Sonderforschungsbereich 378
Ressourcenadaptive
Kognitive Prozesse

ISSN 0944-7814

143

SFB 378: Ressourcenadaptive Kognitive Prozesse

Wolfgang Wahlster und Werner Tack

SFB 378, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

wahlster@dfki.de, tack@cops.uni-sb.de

Abstract

Der interdisziplinäre Sonderforschungsbereich 378 „Ressourcenadaptive Kognitive Prozesse“, dessen erste Förderungsperiode von 1996 bis 1998 läuft, ist an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken angesiedelt. Die Arbeiten des Sonderforschungsbereiches sind der Kognitionswissenschaft zuzurechnen. Als Ausgangspunkt des Sonderforschungsbereiches kann folgendes Ressourcenkonzept gesehen werden: ein kognitiver Agent A löst eine vorliegende Aufgabe T in einer bestimmten Situation S unter Nutzung der Ressourcen R (u.a. Zeit, Speicher, Prozessorkapazität), wobei für A(T,S,R) ressourcenabhängige Variationen der Resultatsqualität und der verwendeten Verarbeitungsmethoden beobachtet werden. Ressourcen sind quantifizierbar und temporär entziehbar. Ressourcenadaptierende Prozesse setzen Metawissen über kognitive Fähigkeiten und die Möglichkeit der metakognitiven Steuerung kognitiver Prozesse voraus. Neben der Anwendung von empirischen Methoden und formalen Modellen wird auch die Modellierung ressourcenadaptiver Prozessen in Softwaresystemen angestrebt. Als Fachdisziplinen sind die Kognitive Psychologie, die Künstliche Intelligenz, die Computerlinguistik und die Analytische Philosophie beteiligt. Als Beispiel für ein Teilprojekt des SFB 378 wird das Vorhaben REAL angeführt, in dem bei der Generierung von sprachlichen Raumbeschreibungen in Dialogsituationen die Interaktion von ressourcenbeschränkter Objektlokalisation und inkrementeller Sprachproduktion untersucht und in einem System zur Beantwortung von räumlichen Orientierungsfragen unter Zeitdruck modelliert wird.

Das Ressourcenkonzept

Als Ausgangspunkt des Sonderforschungsbereiches kann folgendes Ressourcenkonzept gesehen werden: ein kognitiver Agent A löst eine vorliegende Aufgabe T in einer bestimmten Situation S unter Nutzung der Ressourcen R (u.a. Zeit, Speicher, Prozessorkapazität), wobei für A(T,S,R) ressourcenabhängige Variationen der Resultatsqualität und der verwendeten Verarbeitungsmethoden beobachtet werden. Ressourcen sind quantifizierbar und temporär entziehbar. Von ressourcensensitiven Prozessen generiertes Verhalten ist im Idealfall gleichermaßen an Verhaltensziele wie auch an verfügbare Ressourcen angepaßt und genügt so den Kriterien einer „begrenzten Rationalität“.

Wir teilen ressourcensensitiven Prozesse in drei Klassen ein: ressourcenadaptierte, ressourcenadaptive und ressourcenadaptierende Prozesse. Ressourcenadaptierte Prozesse sind auf feste und bekannte Ressourcenbeschränkungen hin optimiert. Die Qualität ihrer Resultate bleibt bei konstanter Eingabequalität gleich.

Ressourenadaptive und ressourcenadaptierende Prozesse beruhen dagegen auf variablen Ressourcenbeschränkungen. Ihre Ausgabequalität hängt damit von den jeweils verfügbaren Ressourcen ab. Während ressourcenadaptive Prozesse eine feste Verarbeitungsstrategie verfolgen, werden in ressourcenadaptierenden Prozessen die

Verarbeitungsstrategien dynamisch durch Metakognition an die jeweiligen Ressourcenbeschränkungen angepaßt.

Ein Beispiel für ressourcenadaptierendes Verhalten geben unter Echtzeitbedingungen laufende Prozesse, bei denen das Verhalten eines externen Partners oder ein anderer Situationsaspekt Zeitschranken vorgibt. Man kann etwa an ein Dialogsystem denken, das sich in seinem Zeitverhalten dem von einem Benutzer vorgegebenen Tempo anpaßt, oder auch an eine Wegauskunft für Autofahrer, die beispielsweise eine Anweisung zum Abbiegen geben muß, bevor das Auto an der kritischen Kreuzung ankommt.

Ressourcenadaptivität als interdisziplinäre Fragestellung

Der interdisziplinäre Sonderforschungsbereich 378 „Ressourcenadaptive Kognitive Prozesse“, dessen erste Förderungsperiode von 1996 bis 1998 läuft, ist an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken angesiedelt. Die Arbeiten des Sonderforschungsbereiches sind der Kognitionswissenschaft zuzurechnen. Neben der Anwendung von empirischen Methoden und formalen Modellen wird auch die Modellierung ressourcenadaptiver Prozessen in Softwaresystemen angestrebt.

In dem Sonderforschungsbereich arbeiten verschiedene Fachbereiche der Technischen Fakultät (Informatik) und der Philosophischen Fakultät (Computerlinguistik, Psychologie, Philosophie) in insgesamt 11 Projekten zusammen, welche in die drei Projektbereiche Modellierung, Architektur und Berechnung untergliedert sind. Als Fachdisziplinen sind die Kognitive Psychologie, die Künstliche Intelligenz, die Computerlinguistik und die Analytische Philosophie beteiligt. Umfassende Information über alle Projekte und Aktivitäten im Sonderforschungsbereich können im World Web Web unter der URL: http://www.coli.uni-sb.de/sfb378/ abgerufen werden.

Kognitionswissenschaft und Künstliche Intelligenz

Das Ziel, Intelligenz und intelligentes Verhalten unter der Randbedingung von Ressourcenbeschränkungen zu verstehen, bildet den gemeinsamen Kern der unterschiedlichen Forschungsbemühungen, zu denen die experimentelle Untersuchung der Leistung von Menschen ebenso gehört wie das Bemühen um die Realisierung von Algorithmen und Heuristiken in Rechensystemen. Kognitionswissenschaft fragt sowohl nach Eigenschaften und Regelhaftigkeiten der beim Menschen natürlich gegebenen Leistungsmöglichkeiten als auch nach der Konzeption und der Realisierbarkeit künstlicher Systeme, deren Leistungen vorgegebenen Kriterien genügen. Eine beide Typen von Fragestellungen und Aufgaben integrierende Theorie der Intelligenz kann aufzeigen, wie sich die Konstituenten intelligenter Funktionen entwickelt haben, welche Grenzen sie der kognitiven Leistung setzen, und wo Potentiale für weitere Verbesserungen liegen. Sie kann zugleich aber auch aufzeigen, wie Computerprogramme menschenähnliche Leistungen erbringen können und auf welche Weise sie natürliche Leistungsgrenzen zu überschreiten gestatten.

Es geht also im Sonderforschungsbereich zentral um Heuristiken, die beim Menschen als natürlich-evolutionäres und bei Rechensystemen als künstlich-konstruktives Resultat einer Anpassung an Ressourcenbeschränkungen angesehen werden, um die Konstruktion und Analyse von Ressourcenkontrolle in kognitiven Prozessen und um die Frage, wie Ressourcenadaptivität im Paradigma nebenläufiger Berechnung darstellbar, analysierbar und konstruierbar ist. Damit werden Möglichkeiten von Modellierungen aufgegriffen und fortentwickelt, die — eben weil sie Ressourcenbeschränkungen und darauf reagierende Anpassungsleistungen berücksichtigen — wesentlich realitätsnäher sind als herkömmliche kognitive Modelle.

Weiterhin ist es ein Grundprinzip der Softwareergonomie und der Mensch-Maschine-Interaktion, daß in interaktiven Informatik-Systemen explizit die Ressourcenbeschränkungen menschlicher Benutzer modelliert werden müssen, wenn in kooperativer Weise das Systemverhalten an den Bediener angepaßt werden soll (vgl. *Wahlster et. al 1995*).

Nachdem man bislang auch in der Forschung zur Künstlichen Intelligenz Ressourcen wie Zeit, Speicherplatz und Verarbeitungskapazität meist idealisierend als unbeschränkt angenommen hat, werden in jüngster Zeit hauptsächlich im Zusammenhang mit Realzeitanwendungen im Bereich der Robotik und der automatischen Planung explizite Modelle der Ressourcenadaptivität diskutiert.

Zeitbeschränkungen und Anytime-Algorithmen

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Behandlung ressourcenadaptiver und ressourcenadaptierender Prozesse sind Restriktionen der zur Erledigung einer Aufgabe verfügbaren Zeit. Entscheidungs- und Inferenzprozesse müssen verkürzt oder abgebrochen werden, wenn die Situation unmittelbares Handeln erfordert; bei beschränkter Zeit dürfen nur die dringlichsten Berechnungsprozesse ausgeführt werden. So muß ein Autofahrer, der plötzlich einen Unfall vor sich sieht, in Bruchteilen von Sekunden entscheiden, ob er eine Vollbremsung oder ein Ausweichmanöver versucht. Dabei darf er nur die wichtigsten Aspekte berücksichtigen (ob die Fahrbahn rechts oder links frei ist oder ob jemand dicht hinter ihm fährt) und nicht über weniger Relevantes nachdenken (wie den starken Reifenabrieb bei Vollbremsung oder das Verrutschen der Ladung im Kofferraum bei abruptem Richtungswechsel). Beim Übergang von idealisierten Laborsystemen zu realistischen Anwendungsszenarien liegt es daher nahe, Ressourcenbeschränkungen von Anfang an in die Theorie und Modellierungsmethodik einzubeziehen und nicht erst bei der Implementierung.

Russell definierte den Begriff des beschränkt-optimalen Programms, das jeweils die beste Lösung bei vorgegebenen Ressourcenbeschränkungen eines kognitiven Prozessors M für eine Klasse von Problemsituationen E findet. In Analogie zum Begriff der asymptotischen Komplexität in der Theorie effizienter Algorithmen kann man nun asymptotisch beschränkt-optimale Programme (ABO) einführen *(Russell et al 1993).* Sei P beschränkt-optimal für M und E, dann hat das Programm P' die ABO-Eigenschaft für M und E genau dann, wenn P' eine bessere Lösung als P produ-

ziert, sobald es auf einem Prozessor kM abläuft, der k mal mehr Ressourcen als M bereitstellt.

In Alltagssituationen gibt es zahlreiche Varianten von Aufgabenstellungen mit Zeitbeschränkungen, die in der KI-Forschung erst seit kurzem untersucht wurden. Es kann beispielsweise eine feste Zeitschranke vorgegeben werden, bei der ein Resultat vorliegen muß. Wird diese Zeitschranke überschritten, so ist das Ergebnis wertlos (eine Quizfrage, die in einer halben Minute beantwortet werden muß). Alternativ gibt es Situationen, in denen eine feste Kostenfunktion für den Zeitverbrauch angesetzt werden kann (Wartezeit für Taxi, Telephongebühren) und eine Problemlösung mit minimalen Kosten gesucht wird. Schließlich taucht häufig der Fall einer stochastischen Fristsetzung auf, bei der Unsicherheit darüber besteht, wann die Zeitschranke bekannt wird. Dies wird meist über eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten der Zeitschranke modelliert.

Im Zusammenhang mit zeitbeschränkten Verfahren spielt der Begriff der unterbrechbaren Algorithmen, die bereits vor ihrer vorgesehenen Terminierung ein jeweils approximatives Resultat liefern, eine besondere Rolle. Dean und Boddy haben 1988 den Begriff der Anytime-Algorithmen als Spezialfall unterbrechbarer Algorithmen eingeführt (*Dean und Boddy 1988*):

1. Anytime-Algorithmen können mit vernachlässigbarem Verwaltungsaufwand jederzeit unterbrochen und wiederaufgenommen werden.
2. Die Resultate von Anytime-Algorithmen werden bei vorzeitiger Terminierung als Funktion der investierten Verarbeitungszeit bezüglich einer Qualitätsmetrik monoton besser.

In der numerischen Mathematik werden im Zusammenhang mit iterativen Approximationsverfahren schon lange Algorithmen mit Anytime-Eigenschaften untersucht. Mithilfe von Methoden der Dynamischen Programmierung können auch für Standardaufgaben der Informatik wie das Travelling Salesman Problem Anytime-Verfahren konstruiert werden, indem bei Unterbrechungen eine einfache Approximationsfunktion auf die im Iterationsverfahren bislang aufgebaute partielle Lösung angewendet wird. Neu ist dagegen die Untersuchung von Anytime-Algorithmen für komplexe symbolische Aufgaben wie Planen, Deduktion, visuelle Wahrnehmung und Sprachverarbeitung, wie sie in unserem Sonderforschungsbereich bearbeitet werden.

Der Zusammenhang zwischen der Laufzeit t eines Anytime-Algorithmus A bis zur Unterbrechung und der dann zu erwartenden Ergebnisqualität Q wird in sog. Performanzprofilen $Q_A(t)$ angegeben (*Russell und Wefald 1991*). Beispielsweise kann beim Bildverstehen die Ergebnisqualität durch die Präzision der resultierenden Bildbeschreibung angegeben werden und beim hierarchischen Planen durch die Spezifizität des generierten Plans. Für die Integration mehrerer Anytime-Komponenten in einem System müssen geeignete Architekturen gefunden werden, die zur Laufzeit optimale Ressourcenallokationen für die verschiedenen elementaren Anytime-Komponenten vornehmen.

Anytime-Verhalten kann auch durch metakognitive Prozesse unterstützt werden. Dabei wird die Fähigkeit ausgenutzt, die eigenen kognitiven Prozesse ressourcenadaptierend so zu wählen und zu steuern, daß eine Aufgabe fristgerecht gelöst wird. Da solche metakognitiven Prozesse zur Garantie von Anytime-Verhalten selbst aber wieder nicht unerhebliche Ressourcen in Anspruch nehmen, werden Compilationsprozesse für die notwendigen Berechnungen auf der Metaebene vorgeschlagen.

Ressourcenadaptierende Prozesse

Ressourcenadaptierende Prozesse setzen Metawissen über kognitive Fähigkeiten und die Möglichkeit der metakognitiven Steuerung kognitiver Prozesse voraus.

Die Grundidee ressourcenadapierender kognitiver Prozesse besteht in der expliziten Betrachtung eines Nutzwertes einer Informationsverarbeitungsleistung (IVL) im Sinne folgender Abhängigkeit:

Nutzwert einer IVL = Ergebnisqualität - k ∗ Ressourcenaufwand

wobei der Ressourcenaufwand z.B. als Zeitaufwand oder Speicheraufwand bzw. deren Summe berechnet werden kann. In den meisten Situationen ist man an einer Optimierung des Nutzwertes interessiert, wobei man eine monotone Qualitätsverbesserung bei steigendem Ressourcenaufwand voraussetzt. Durch den Faktor k können unterschiedliche Kostenfunktionen im Subtrahenden modelliert werden.

Der Zusammenhang zwischen Ergebnisqualität und Ressourcenaufwand für einzelne Prozesse wird oft durch deterministische oder stochastische Performanzprofile modelliert, wobei bei einer sequentiellen Dekomposition in ressourcenadaptierende Teilprozesse eine Konditionierung der Performanzprofile bezüglich der Qualität der Eingabedaten vorzunehmen ist. Hier kann man zunächst eine weitere Monotonitätsannahme machen,

Bei höherer Eingabequalität steigt die Qualität der Ausgabe.

die oft sogar zu einer Linearitätsannahme verschärft werden kann:

Die Ausgabequalität steigt linear mit der Eingabequalität.

Eine der grundlegenden Forschungsfragen ist es, wie mehrere ressourcenadaptierende Prozesse so gesteuert werden können, daß der Nutzwert einer komplexen Informationsverarbeitungsleistung in einer konkreten Situation angemessen hoch ist.

Wenn einem kognitiven Prozeß Ressourcen partiell oder vollständig entzogen werden, kann das zu einer Unterbrechung oder einem Abbruch führen, wobei man dann die Ausgabe partieller Lösungen erwartet. Gemäß Performanzprofil soll die Qualität der partiellen Lösungen dann wieder mit dem Ressourcenverbrauch steigen. Als Qualitätsmaß für eine partielle Lösung wird oft die Distanz der partiellen Lösung von einer exakten Lösung verwendet.

Für Probleme, deren exakte Lösung eine binäre Entscheidung (meist: wahr/falsch) ist, bietet es sich an, die Distanz des Subproblems, für das die partielle Lösung eine exakte Lösung ist, von dem Gesamtproblem zu betrachten. Ein spezielle Variante

dieses Ansatzes beruht auf der schrittweisen Betrachtung immer größerer Teilmengen des Originalproblems. Dies wird etwa beim hierarchischen Planen schon so realisiert, da schrittweise immer mehr Vorbedingungen der geplanten Aktionen mit in die Betrachtung einbezogen werden. Eine simple Variante für Deduktions- oder Parsingprozesse ist die schrittweise Erweiterung des betrachteten Alphabets oder beim Suchen die Lösung über verkleinerten Suchräumen, die schrittweise immer stärker in Hinblick auf den Originalsuchraum vergrößert werden.

Statt der simplen Einschränkung des Alphabets kann man auch strukturelle Einschränkungen betrachten. So ist bei der Entscheidung des Wortproblems für die Sprache $a^n b^n$ eine partielle Lösung schon eine Entscheidung für die Sprache $a^n b^m$. Beide Arten von Restriktionen werden nochmals bei partiellen Lösungen von Constraint-Problemen deutlich, wie sie ursprünglich für überbestimmte Constraint-Probleme entwickelt wurden (PCS-Verfahren). Partielle Lösungen können schrittweise durch die Evaluation einer mononton anwachsenden Menge von Constraint-Variablen oder die schrittweise Hinzunahme von Constraints immer weiter in Richtung auf die Lösung des Originalproblems erweitert werden

Als Beispiel für ein Teilprojekt des Sonderforschungsbereichs soll kurz auf das Projekt REAL eingegangen werden.

REAL: REssourcenAdaptive Lokalisation

Am Beispiel der Generierung von sprachlichen Raumbeschreibungen in Dialogsituationen wird in REAL die Interaktion von ressourcenbeschränkter Objektlokalisation und inkrementeller Sprachproduktion untersucht und in einem System zur Beantwortung von räumlichen Orientierungsfragen modelliert. Zunächst soll das kognitive System unter variierenden Ressourcenbeschränkungen einem Kommunikationspartner "Wo"-Fragen über seine aktuelle visuelle Umgebung in unterschiedlichen Raumszenarien beantworten können.

Unter Berücksichtigung experimenteller Befunde aus der kognitiven Psychologie werden damit die informatischen Grundlagen für die realitätsnahe Generierung von Lokalisierungsausdrücken, etwa in künftigen Fahrer-Navigationssystemen, mobilen Robotik-Systemen oder Wegauskunfts-Systemen, erarbeitet. Das System wird so parametrisiert, daß es unter Zeitdruck mit der Verbalisierung von Lokalisierungsausdrücken beginnen kann, bevor die räumliche Suche und die Abbildung lokaler Relationen auf Raumpropositionen voll abgeschlossen sind.

Bei einer solchen inkrementellen Generierung ergibt sich ein interessantes Spektrum an Performanzerscheinungen von der schrittweisen Verfeinerung der Raumbeschreibung bis hin zur Selbstkorrektur von bereits geäußerten Fragmenten, die in dem zu entwickelnden System modelliert werden sollen. Hierzu werden Anytime-Algorithmen entwickelt, die bei Variation der temporalen und sensorischen Randbedingungen stets kommunikativ adäquate, wenngleich auch approximative Ergebnisse liefern. Dabei werden insbesondere die Suche nach Referenzobjekten, die Berechnung von räumlichen Relationen und der Antizipation der Hörervorstellung

unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenbeschränkung formalisiert und in einem integrierten Prozeßmodell implementiert.

Bei der Objektlokalisation in REAL kann man gemäß des Prinzips der Verwechslungsvermeidung fordern, daß eine exakte Lösung in einer sprachlichen Raumbeschreibung besteht, die nur noch genau ein Objekt als Interpretation für das gegebene räumlichen Szenario zuläßt und somit die Ambiguität minimiert hat. Eine partielle Lösung ist dann eine Deskription, die für eine Teilmenge der in der Szene vorhandenen Objekte eine Verwechslung ausschließt. Hier kann z.B. mittels der Salienz von Objekten eine partielle Ordnung über den Elementen der Potenzmenge der Szenenobjekte definiert werden.

Im Rahmen der Dissertation von Maaß wurde im Projekt REAL ein kognitiver Agent zur inkrementellen Wegbeschreibung realisiert, der eine Dekomposition des geschätzten Zeitrahmens für die Ausführung einer Wegbeschreibungsaktion in die Intervalle Generierungszeit, Präsentationszeit, Rezeptionszeit und Ausführungszeit für den Navigationsakt vornimmt. Damit wurden wichtige Grundlagen für die nächste Generation von intelligenten Assistenzsystemen für die Fahrernavigation gelegt und die Anwendungsrelevanz der Resultate des Sonderforschungsbereichs 378 nachgewiesen.

Literatur

Dean und Boddy 1988
T. Dean & M. Boddy (1988). An analysis of time-dependant planning. In *Proceedings of AAAI-88* (pp. 49–54). St. Paul: AAAI.

Maaß 1996
W. Maaß (1996). *Von visuellen Daten zu inkrementellen Wegebeschreibungen in dreidimensionalen Umgebungen. Das Modell eines kognitiven Agenten.* Dissertation, Fachbereich Informatik, Lehrstuhl Prof. W. Wahlster, Univ. Saarbrücken.

Russell und Wefald 1991
S. Russell & E. Wefald (1991). *Do the right thing: Studies in limited rationality.* Cambridge: MIT Press.

Russell et al 1993
S. Russell, D. Subramanian & R. Parr (1993). Provably bounded optimal agents. In *Proceedings of the Thirteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence* (pp. 338–344). Chambery: IJCAII.

Wahlster et al. 1995
W. Wahlster, W., A. Jameson., A. Ndiaye, R. Schäfer, T. Weis (1995). Ressourcenadaptive Dialogführung: ein interdisziplinärer Forschungsansatz. In: *Künstliche Intelligenz*, 9(6), 1995, pp. 17-21.