

Diss. ETH No 15451

Designing neuromorphic interactive spaces

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by

Kynan Eng

B. Sc., B. E. (Hons.)

Monash University, Melbourne, Australia

Born 22 May, 1974

Citizen of Australia

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Rodney J. Douglas

Dr. Paul F. M. J. Verschure

Assoc. Prof. Joseph Paradiso

2004

Abstract

This thesis describes the construction and performance of a novel, large-scale, complex, autonomous behaving system that used computing techniques based on the operating principles of natural nervous systems. The system – a multi-modal, interactive, human entertainment space called Ada – was deployed as a major exhibit at the Swiss National Exposition, Expo.02. The key challenge in its design was the integration of heterogeneous hardware and software components into a coherent brain-like (“neuromorphic”) framework capable of supporting real-time interactions. Ada used different sensors (tactile sensory floor, microphones, pan-tilt cameras) and effectors (floor tile lighting, video projections, pan-tilt lights, global and local speakers) to track and engage up to 30 simultaneous visitors in activities such as cue following and game playing. A layered software architecture was developed to support this functionality, incorporating multiple neuromorphic computing models. Several novel algorithms were implemented and tested within this framework for tasks such as adaptive behavioural selection, emotional expression, tactile person tracking and audio processing.

The key principles of neuromorphic engineering – parallel processing, distributed networked computation, and the use of stereotyped computational units – have been derived from the study of naturally occurring organisms. It is widely predicted that these principles will enable a new class of artefacts that can function autonomously and adaptively in unpredictable environments with similar degrees of success to their natural counterparts. There has already been some progress in this direction, for example in simple robots featuring neuromorphic visual processing and auditory localisation. This thesis extends neuromorphic principles to very large systems and applies them to spaces for human interaction – a domain for which no natural analogues exist – by considering spaces as inside-out robots. Some techniques found in conventional robots translate easily to a space, eg. auditory localisation, visual processing and behaviour selection. Others, such as tactile person tracking and communication with the space’s users, require substantial innovation to provide the necessary functionality. All of these architectural elements are brought together in the design of Ada, an unprecedented synthesis in the design of interactive spaces and large-scale autonomous systems.

Despite the difficulties of performing tests and collecting data in a tightly constrained commercial exhibit, Ada was successfully deployed and experimented with for 10-12 hours per day over 159 consecutive days at the Expo.02. Correct system operation and more than adequate reliability was demonstrated, despite the complexity of the software and the difficult operating conditions. Over 553,700 visitors passed through the exhibit, which suffered less than 0.8% downtime due to system faults and a mean time between critical failures (MTBF) of over 16 hours. This level of reliability matches that of “conventional” prototype robots, most of which are significantly less complex than Ada and never subjected to long-term human interaction. There is also no other known interactive space with the same level of complexity and reliability as that found in Ada. The acceptable system reliability results can be at least partly attributed to Ada’s neuromorphic design, which facilitated the localisation of software errors and enabled partial software restarts and maintenance to occur while the system was running. A Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) was conducted to identify key

recommendations for reliability improvements. Implementing these recommendations should enable future Ada-like systems to become sufficiently reliable for wider application.

While the Expo.02 period confirmed Ada's reliability, it was also a rare opportunity to gain a quantitative understanding of human behaviour in interactive spaces. Previous studies of human behaviour in urban areas were limited by resolution, area coverage and the range of feasible experimental conditions. Ada provided the ideal infrastructure to overcome these difficulties – thousands of willing participants could be presented with repeatable visual and auditory stimuli, tracked as they moved around, and asked questions. Data collected from Ada and visitor questionnaires showed that visitors' perceptions could be predicted by observing their movements in the space. Their spatial distributions and activity patterns could be affected by changing the entry/exit placement and the visibility of spectators waiting in the queue. It was also found that their attitudes and their overall activity levels could be manipulated by changing the conditions within the space. Adaptive behaviour selection tests, conducted using a neural model of classical and operant conditioning, showed that Ada was able to learn to select appropriate cues that influence visitors' movements.

Overall, these results demonstrate the viability of the neuromorphic architecture used to design Ada, opening the way for the further deployment of neuromorphic interactive spaces. The data collected from Ada during the Expo.02 also shows that it is possible for a space to predict its users' attitudes and to actively influence their behaviour by engaging in a dialogue with them.

Zusammenfassung

Diese Dissertation beschreibt den Aufbau und die Leistung eines neuartigen, grossräumigen, komplexen, autonom verhaltenden Systems, das Computertechniken verwendet, die auf den Funktionsprinzipien des natürlichen Nervensystems basieren. Das System heisst Ada und ist ein multi-modaler, interaktiver Unterhaltungsraum für Menschen. Ada wurde als einer der Hauptattraktionen an der schweizerischen Landesausstellung Expo.02 ausgestellt. Die grösste Herausforderung an Adas Design war die Integration der heterogenen Hardware- und Softwarebausteine in ein zusammenhängendes, gehirnähnliches ("neuromorphes") System, das Echtzeitinteraktionen unterstützen kann. Ada benutzte unterschiedliche Sensoren (sensorischer Taktildruckboden, Mikrophone, bewegliche Kameras) und Effektoren (Fussbodenbeleuchtung, Videoprojektionen, bewegliche Lichter, globale und lokale Lautsprecher), um gleichzeitig bis zu 30 Besuchern zu folgen und diese in Tätigkeiten zu engagieren, wie Spielen und das Folgen von Signalen. Eine geschichtete Software-Architektur wurde entwickelt, welche verschiedene neuromorphe Computermodelle vereinigt, um die Funktionalität von Ada zu unterstützen. In diesem Rahmen wurden einige neuartige Algorithmen für unterschiedliche Funktionen entwickelt, wie zum Beispiel adaptives Wählen von Verhaltensmustern, Ausdruck von Emotionen, taktiles Aufspüren von Personen, und Audiodatenverarbeitung.

Die Hauptprinzipien der neuromorphen Technik sind Parallelverarbeitung, verteilte vernetzte Berechnung und der Gebrauch von stereotypierten Rechenelementen, welche vom Studium natürlich vorkommender Nervensysteme abgeleitet worden sind. Es wird weithin vorhergesagt, dass diese Prinzipien eine neue Kategorie von Artefakten ermöglichen werden, die in unvorhersehbaren Umgebungen mit ähnlichem Erfolg autonom und adaptiv arbeiten können wie ihre natürlichen Gegenstücke. Es hat bereits Fortschritt in diese Richtung gegeben, z.B. einfache Roboter, die mit neuromorpher visueller Verarbeitung und Geräuschlokalisierung funktionieren. Diese Dissertation baut die neuromorphen Prinzipien auf sehr grosse Systeme aus und wendet sie in Räumen mit menschlicher Interaktion an, wofür es kein natürliches Beispiel gibt. Hierzu werden die Räume als von Innen nach Aussen gekehrte Roboter betrachtet. Einige Techniken, die aus herkömmlichen Robotern stammen, lassen sich leicht für einen Raum übersetzen, z.B. Geräuschlokalisierung, visuelle Verarbeitung und das Auswählen von Verhaltensmustern. Andere Techniken erfordern erhebliche Innovationen, wie taktiles Aufspüren von Personen und Kommunikation mit den Benutzern des Raums. Diese verschiedenen architektonischen Elemente werden im Design von Ada zusammengebracht in einer einzigartigen Synthese: das Design von interaktiven Räumen und autonomen Grosssystemen.

Die Durchführung von Untersuchungen und das Sammeln von Daten ist erschwert während einer kommerziellen Ausstellung mit engen Betriebsbedingungen, doch wurde Ada an der Expo.02 über 159 Tage 10-12 Stunden pro Tag erfolgreich eingesetzt und so konnten viele Untersuchungen durchgeführt werden. Korrekter Systembetrieb und mehr als ausreichende Zuverlässigkeit wurden demonstriert trotz komplexer Software und schwierigen Betriebsbedingungen. Über 553.700 Besucher haben die Ausstellung besucht, die weniger als 0.8% Stillstandszeit wegen Systemstörungen und eine mittlere störungsfreien Zeit (MTBF) von über 16 Stunden

aufwies. Diese Zuverlässigkeit ist vergleichbar mit herkömmlichen Prototypen von Robotern, von denen die meisten weniger kompliziert sind als Ada und keine langfristige menschliche Interaktion bewältigen müssen. Es gibt auch keinen anderen bekannten interaktiven Raum mit dem gleichen Niveau von Komplexität und Zuverlässigkeit wie Ada. Die ansehnliche Zuverlässigkeit kann teilweise Adas neuromorphem Design zugeschrieben werden, welches die Lokalisation von Software-Störungen erleichterte und teilweise Software-Restarts und -wartung während des Betriebes ermöglichte. Eine „Failure Mode Effects and Criticality Analysis“ (FMECA) wurde ausgeführt, um wichtige Empfehlungen zu identifizieren für die Verbesserung der Zuverlässigkeit. Die Einführung dieser Empfehlungen sollten zukünftige Ada-Systeme genügend zuverlässig für Verbraucheranwendungen machen.

Die Expo.02 bestätigte Adas Zuverlässigkeit und sie war auch eine seltene Gelegenheit, ein quantitatives Verständnis des menschlichen Verhaltens in interaktiven Räumen zu gewinnen. Bisherige Studien des menschlichen Verhaltens in Stadtgebieten wurden beschränkt durch Auflösungsvermögen, Flächendeckung und Durchführbarkeit experimenteller Bedingungen. Ada stellte die ideale Infrastruktur zur Verfügung, um diese Schwierigkeiten zu überwinden. Tausenden von willigen Teilnehmern konnten wiederholbare Sicht- und Gehörstimuli präsentiert werden, sie konnten beobachtet werden, während sie sich bewegten, und es konnten ihnen Fragen gestellt werden. Gesammelte Daten von Ada und Besucherfragebögen zeigten, dass die Wahrnehmung der Besucher vorausgesagt werden kann, indem man ihre Bewegungen im Raum beobachtete. Ihre räumlichen Verteilungen und Tätigkeiten konnten beeinflusst werden, indem man die Platzierung des Ein- und Ausgangs und die Sichtbarkeit der Zuschauer, die in der Warteschlange warteten, änderte. Ihr Verhalten und ihr gesamter Grad der Aktivität konnte manipuliert werden, indem man die Bedingungen innerhalb des Raumes änderte. Die adaptiven Tests zur Wahl von Adas Verhaltensmustern basieren auf einem neuronalen Modell von klassischer und operanter Konditionierung. Anhand dieser Tests zeigen wir Adas Lernfähigkeit, die sich ausdrückt in der Auswahl bestimmte Verhaltensmuster, um die Bewegungen von Besuchern zu beeinflussen.

Insgesamt zeigen diese Resultate, dass die hier angewandte neuromorphe Architektur stark entwicklungsfähig ist. Der Weg ist offen für weitere Einsätze der neuromorphen interaktiven Räume. Die Daten, die von Ada während der Expo.02 gesammelt wurden, zeigten, dass es möglich ist für einen Raum, die internen Zustände seiner Benutzer vorauszusagen und ihr Verhalten aktiv zu beeinflussen, indem er in einen Dialog mit ihnen tritt.