- Die Kapselung aller Hardware-Eigenschaften durch ähnlich strukturierte Server-Prozesse, die mehreren Lesern oder einem Schreiber Zugriff gewähren.
- Eine flexible Priorisierung des schreibenden Zugriffs der einzelnen Module auf die Server der Aktorik durch ein Tokenverwaltungs-Modul. Dieses ist flexibler als etwa die feste Priorisierung der Subsumption-Architektur und setzt keine hierarchische Kontrolle wie in früheren mehrschichtigen Architekturen voraus.

Das Zusammenwirken der bisher realisierten Komponenten wird an zwei Anwendungen in einem kurzen Videofilm sowie ggf. in einer Demo des echten Roboters demonstriert.

## Literatur


[AAAI94] R. Simmons: *The 1994 AAAI Robot Competition and Exhibition,* AI Magazine, Summer 1995, pp. 19-30

[AAAI95] D. Hinkle, D. Kortenkamp, D. Miller: *The 1995 Robot Competition and Exhibition*, AI Magazine, Spring 1996, pp. 31-45.

[AMS94] P. Levi, T. Bräunl (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 1994,* Informatik Aktuell, Springer-Verlag, 1994

[AMS95] R. Dillmann, U. Rembold, T. Lüth (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 1995*, Informatik Aktuell, Springer-Verlag, 1995

[AMS96] G. Schmidt, F. Freyberger (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 1996,* Informatik Aktuell, Springer-Verlag, 1996

[SchVol96] R. D. Schraft, H. Volz: *Serviceroboter*, Springer-Verlag, 1996.

[Thrun96] S. Thrun, A. Bücken, W. Burgard, D. Fox, T. Fröhlinghaus, D. Hennig, T. Hofmann, M. Krell, T. Schmidt: *Map Learning and High-Speed Navigation in RHINO*

- Der Vision-Server ist einer der komplexesten Server, da er die Wünsche potentiell mehrerer Leser nach Bilddaten verschiedenen Bildformats und unterschiedlicher Auflösung unter den härtesten Zeit- und Bandbreitenbedingungen befriedigen muß.

Von besonderem Interesse ist die Tokenverwaltung, die den Schreibzugriff auf die mit Aktorik verbundenen Server regelt. Hierzu existiert für jeden Aktuator-Server ein Token, das dem Modul der taktischen Ebene exclusives Schreibrecht für den jeweiligen Server gibt. Der Token-Mechanismus würde es auch erlauben, verschieden priorisierte Token einzusetzen, wobei aber in der ersten Realisierung nur zwei Prioritätsklassen zum Einsatz kommen. Das Modul der Gefahrbewältigung kann sich nämlich mit einem sog. Super-Base-Token sofort Zugriff auf die Roboterbasis verschaffen und z.B. Kollisionen vermeiden.

Die in Abbildung 2 grau unterlegten Module sind größtenteils semantisch konkurrierend. Das Zusammenspiel dieser Komponenten wird von der High-Level-Steuerung mit Hilfe des Tokenmechanismus koordiniert.

Die darunterliegenden weißen Module können hingegen beliebig parallel ablaufen. Sie stellen Fähigkeiten der taktischen Ebene zur Verfügung, auf die andere Module zurückgreifen können. Hierzu gehören:

- Die Personendetektion, die Personen kamerabasiert detektieren soll.
- Die Personenidentifikation, die die detektierten Personen identifizieren soll.
- Die Objektdetektion, die andere Objekte (z.B. Roboter, Flaschen, Dosen, Hinweisschilder, Türen, etc.) detektiert und klassifiziert.
- Die Greifplanung, die den Einsatz des Greifers steuert.
- Das Kartenaufbau-Modul, das verschiedene Typen von Karten verwaltet und Sensordaten in diesen Karten fusioniert. Derzeit existieren roboterzentrierte Freiraumkarten und Gitterbelegungskarten (occupancy-grid). Topologische Karten sollen bis Oktober ebenfalls verfügbar sein.
- Die Pfadplanung verwendet die jeweils für die Aufgabe geeignetsten Karten zur Fahrtplanung.
- Ein Spracherkennungsmodul ist geplant, muß aber wegen beschränkter Personalkapazität zunächst einmal zurückgestellt werden.
- Ein Visualisierungsmodul stellt die Daten (Karten, Pfade, erkannte Objekte bzw. Personen) graphisch dar. Es hat keine Leseschnittstelle wie die anderen Module, sondern dient nur der Ausgabe.

Als Module, die sich größtenteils gegenseitig konzeptionell ausschließen, wurden die Personenverfolgung, die Objektverfolgung, der Greifdienst, der Lieferdienst und die Exploration identifiziert. Diese sind allerdings bisher erst ein rudimentären Versionen (Objektverfolgung, Greifdienst, Exploration) bzw. noch nicht (Personenverfolgung, Lieferdienst) realisiert.

Auch die High-Level-Steuerung ist bisher nur in einfachster Weise realisiert, ebenso wie die Benutzerschnittstelle. Die High-Level-Steuerung aktiviert alle benötigten Module und schaltet durch Zugriff auf die Tokenverwaltung die Tokens für die entsprechenden Module frei bzw. entzieht ihnen die Tokens. Die Module selbst können bei der Tokenverwaltung Tokens anfordern, die dann den Schreibzugriff auf die entsprechenden Server erlaubt. Ein Kommunikationsmodul wird später den Datenaustausch mit den anderen Robotern regeln.

Was ist neu an diesem Ansatz? Im vorgeschlagenen Softwarekonzept sind folgende Ideen, wenn nicht individuell, so doch durch ihre Kombination, bei mobilen Robotern neu:

- Eine konsequente Modularisierung in viele einzelne Prozesse, die über Message-Passing (TCX) in einem PC-basierten-Multiprozessorsystem unter Linux miteinander kommunizieren.

setzen, geschah vor allem aus Kostengründen und Gründen der leichten Verfügbarkeit. Bisher stellte sich diese Wahl, die viele andere Mobile-Roboter-Gruppen in jüngster Zeit ebenso getroffen haben, noch nicht als falsch heraus.

BeeSoft stellt eine Reihe von Servern zur Verfügung, mit denen die Basis hardwareneutral angesteuert werden kann und die Sensorik der Roboter angesprochen wird. Diese wurden teilweise ergänzt und umgeschrieben, weil beispielsweise keine gleichzeitigen Leser unterstützt werden. Die gesamte Softwarestruktur ist in Abbildung 2 angegeben.

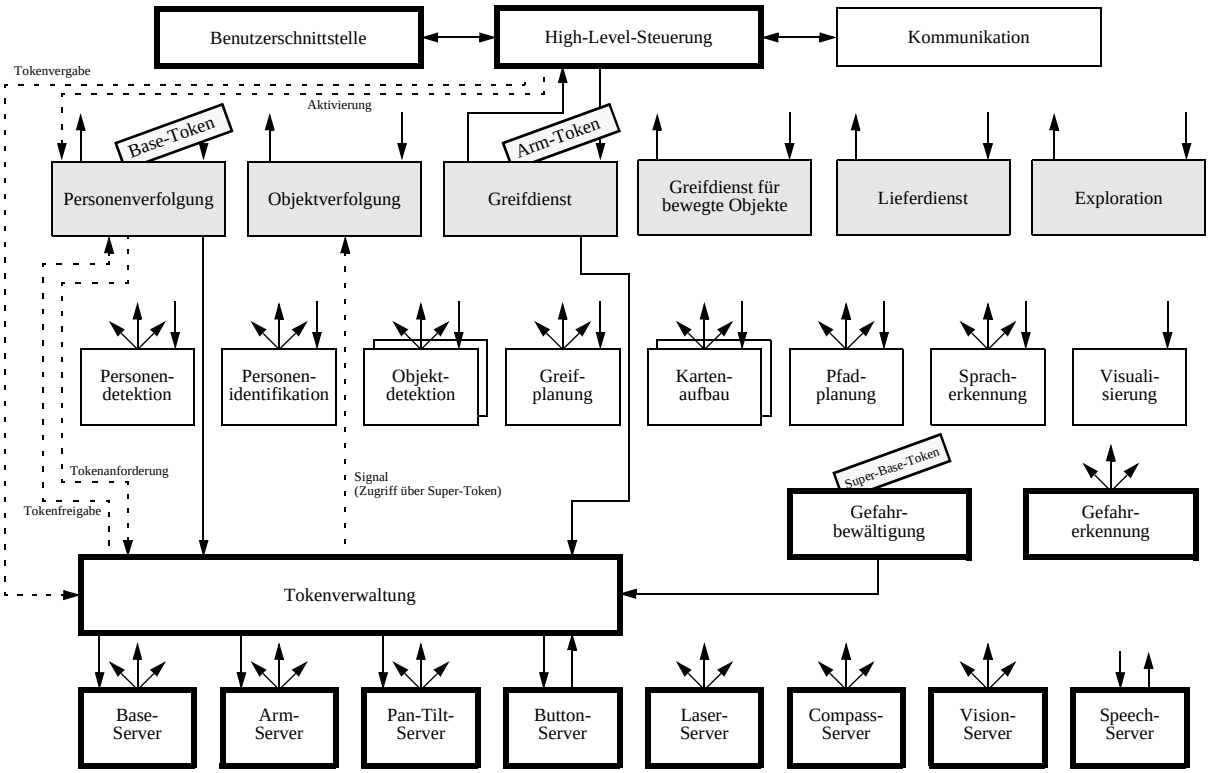


*Abbildung 2: Softwarestruktur der mobilen Roboter Robin und Colin*

Sie soll hier bottom-up beschrieben werden, weil sie auch in dieser Reihenfolge realisiert wird. Man erkennt auf der untersten Ebene die folgenden Server:

- Der Base-Server ist der wichtigste Server: Er steuert die Bewegung des Roboters und übernimmt die Ansteuerung bzw. das Auslesen der Ultraschall-, Infrarot- und taktilen Sensoren.
- Der Arm-Server steuert den versenkbaren 4-DOF-Greifarm.
- Der Pan-Tilt-Server steuert die Schwenk-Neige-Einheit des Vision-Systems.
- Der Button-Server dient nur dazu, die farbigen Steuerbuttons auf der Top-Plattform zu beleuchten, einzuschalten bzw. abzufragen.
- Der Laser-Server verteilt die aufbereiteten Daten des Laserscanners und stellt trotz der verschiedenen Laserscanner (Leuze RS-3 bzw. Sick PLS-200) eine einheitliche Schnittstelle nach oben zur Verfügung, die von mehreren Clients gelesen werden kann.
- Der Compass-Server dagegen ist wiederum relativ einfach und wenig zeitkritisch.
- Der Speech-Server dient der (derzeit nur in Englisch verfügbaren) Sprachausgabe geschriebener Texte.

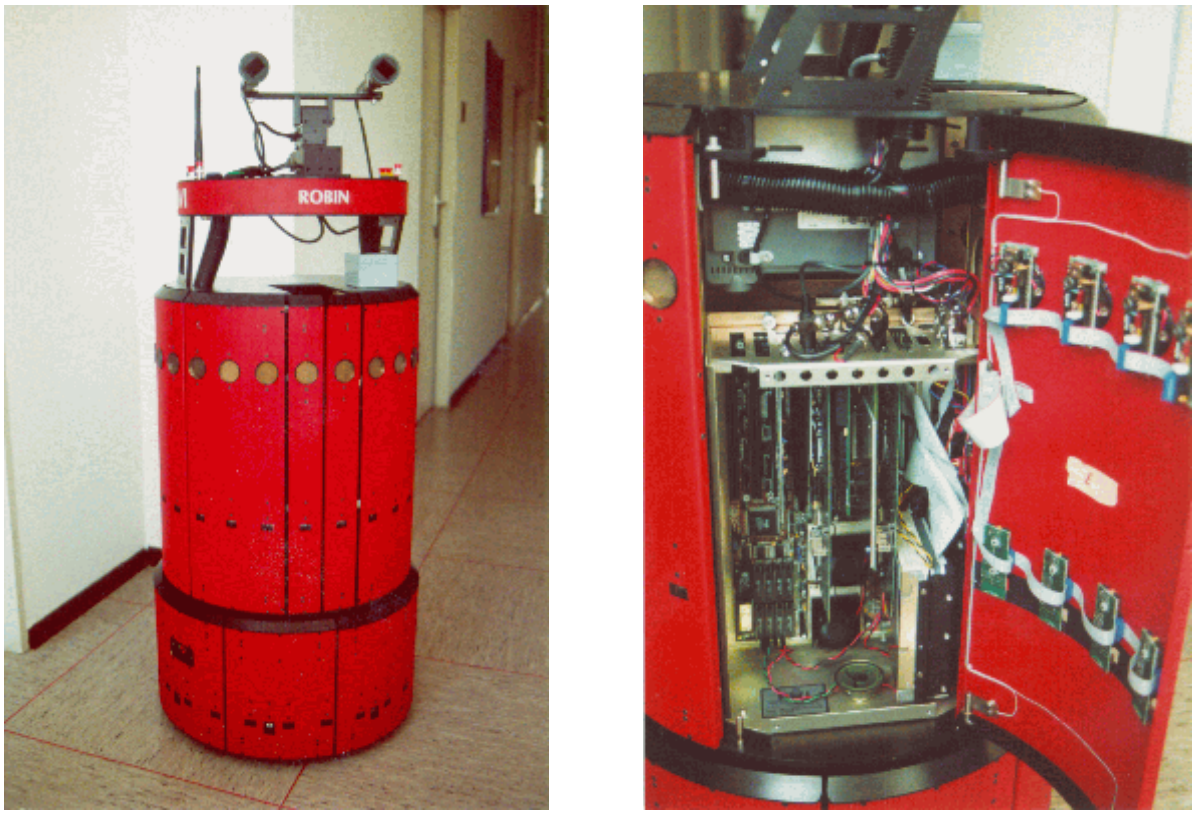


*Abbildung 1: Der mobile Roboter Robin (RWI B21). Man erkennt links die Pan-Tilt-Unit mit Stereo-Kamerasystem, die Funk-Ethernet-Antenne und das helle Kompaß-Modul. Rechts sieht man einen der beiden Doppelprozessor-Pentium PCs und den Access-Bus mit den Ultraschall- und Infrarotsensoren.*

Die Basis besitzt bei beiden Robotern einen Mikrokontroller für die Low-Level Regelung der Fahrkommandos, der über eine serielle Schnittstelle angesprochen wird. Der Roboter kann sich durch den 4-rädrigen Synchronantrieb in jede Richtung bewegen. Von den auf dem Markt befindlichen runden Robotern besitzen die Modelle B21 mit 4 Batterien à 375 Wh wohl auch die größte Batteriekapazität, die bis zu 6 Stunden kontinuierliche Operation zuläßt.

Nach den an der Universität Stuttgart miterlebten Erfahrungen, daß es extrem schwierig ist, die Bilddaten mehrerer Roboter zuverlässig in guter Qualität störungsfrei und wenig verzögert über Bildfunkstrecken zu senden, wurden Robin und Colin so konzipiert, daß die komplette Bildverarbeitung und die komplette Steuerung on-board geschehen kann. Dies schränkt die Verwendung spezieller Hardware (Datacube, Neurocomputer, Kantenextraktionshardware, Parallelrechner etc.) ein und zwingt zur Limitierung auf kleinere Bildgrößen oder niedrigere Bildfrequenzen bei der Bildverarbeitung, was aber bewußt toleriert wird.

Die Softwarearchitektur von Colin und Robin ist identisch und basiert auf der von RWI zur Verfügung gestellten Software RAI, die vor kurzem zu BeeSoft erweitert und umbenannt wurde. In BeeSoft flossen Ergebnisse der Rhino-Software der Universität Bonn [Thrun96] ein.

Prinzip der RAI- und der Bee-Software ist die Aufteilung in Module, die in Form von Prozessen realisiert sind und mit Hilfe der an der CMU entwickelten Kommunikationssoftware TCX kommunizieren. TCX ist vergleichbar mit PVM oder MPI, allerdings etwas einfacher und weniger mächtig, dafür aber speziell für Echtzeit-nahe Anforderungen entwickelt, wie sie bei mobilen Robotern auftreten. Die Begründung, Linux statt eines echtzeitfähigen Betriebssystems wie OS/9 oder VxWorks einzu-

# Systemarchitektur der autonomen mobilen Roboter Robin und Colin der Universität Tübingen

Andreas Zell, Stefan Feyrer, Marc Ebner, Alexander Mojaev,
Oliver Schimmel, Kurt Langenbacher
Universität Tübingen, WSI, Abt. Rechnerarchitektur
Köstlinstr. 6, D-72074 Tübingen
{zell, feyrer, ebner, mojaev, schimmel, langenba}@informatik.uni-tuebingen.de

## Erweiterte Kurzfassung

Wir beschreiben hier die Hardware- und Software-Systemarchitektur der beiden mobilen Serviceroboter Robin und Colin der Universität Tübingen. Robin und Colin sind beide Roboter des Typs B21 des US-Herstellers Real World Interface (RWI).

Beide Roboter besitzen ein Stereo-Kamerasystem mit zwei synchronisierten Sony ST999 PAL-Videokameras auf einer Pan-Tilt-Unit der Firma Directed Perception und zwei Framegrabber. Des weiteren sind sie ausgestattet mit 24 Polaroid Ultraschallsensoren, 56 Infrarotsensoren (davon je 24 waagrecht gerichtete im Oberteil und in der Basis sowie 8 auf den Boden gerichtete in der Basis), 56 taktile Sensoren in den Abdeck-Paneelen der Basis und des Oberteils, einen digitalen Kompaß, einen Laser-Entfernungsmesser und einen versenkbaren 4-DOF-Greifarm. Sie sind mit einer 2Mbit-Funkethernet-Verbindung in unser LAN von Unix-Workstations und Linux- bzw. Windows NT-PCs integriert.

Der rote B21 Roboter, Robin (siehe Abbildung 1), besitzt zwei Doppelprozessor-Pentium/133MHz PCs unter Linux. Einer der PCs ist mit zwei PCI-Framegrabbern ausgestattet und führt die Bildverarbeitung durch, der andere ist für die Fahrsteuerung, Navigation und Planung sowie die Sprachverarbeitung zuständig. Robin besitzt einen Laser-Entfernungsmesser der Firma Leuze, der in Kniehöhe auf der Rückseite des Roboters angebracht ist. Die rückseitige Anbringung wurde durch die Anforderungen niedriger Scanhöhe bei gleichzeitiger Nicht-Beeinträchtigung des versenkbaren Greifarms an der Vorderseite diktiert. Da der Laserscanner Leuze RS-3 mit 720 Meßpunkten pro 180°-Scan bei weitem die beste Auflösung und Genauigkeit der verwendeten Abstandssensoren besitzt, hat dies zur Konsequenz, daß sich Robin in „Krebsfahrt“ rückwärts bewegt, wenn er schnell die Gänge entlangfahren möchte. Da Robin (vom leicht hervorstehenden Laserscanner abgesehen) einen runden Grundriß und einen 4-rädrigen Synchronantrieb besitzt und auch die Kameras um 180° schwenkbar sind, ist dies aber nur bei Greifvorgängen eine Beeinträchtigung, weil er sich dann zum Greifen kurz vor dem Ziel umdrehen muß.

Sein neuer Bruder, Colin, ein blauer B21 Roboter, ist eine Weiterentwicklung, die in Bezug auf die Integration des Laserscanners und der Rechenleistung von RWI auf unsere Anforderungen hin noch verbessert wurde. Ebenso wie das von uns spezifizierte PAL-Stereobildverarbeitungssystem wurde der neue Roboter vom Hersteller in sein Standardprogramm aufgenommen und auch bereits anderen Kunden, wie z.B. der Universität Ulm, verkauft. Colin besitzt zwei Doppelprozessor-PentiumPro/200MHz PCs, deren Funktionalität in gleicher Weise wie bei Robin aufgeteilt ist. Besonders interessant bei Colin ist die Lösung für den Laserscanner PLS200 der Firma Sick, der aufgrund seiner geringeren Höhe in einem neu konstruierten Zwischenring zwischen Basis und Oberteil untergebracht werden konnte. Ohne Beeinträchtigung durch Stützpfosten besitzt er ein Blickfeld von 180° nach vorne, außerdem ist er durch seine Unterbringung im Innern des Roboters auch noch besser geschützt.