

# SISTEMAS DE GUIAGEM E NAVEGAÇÃO: UMA ABORDAGEM PARA DESENVOLVIMENTO DE ROBÔS E VEÍCULOS AGRÍCOLAS AUTÔNOMOS

## Rafael Vieira de Sousa

Escola de Engenharia de São Carlos - USP / Embrapa Instrumentação Agropecuária, R. XV de Novembro, 1452, Centro, CEP 13560-970, São Carlos, SP, e-mail: rafael@cnpdia.embrapa.br.

## Ricardo Yassushi Inamasu

Embrapa Instrumentação Agropecuária, R. XV de Novembro, 1452, Centro, CEP 13560-970, São Carlos, SP, e-mail: ricardo@cnpdia.embrapa.br.

## Arthur José Vieira Porto

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Depto. de Engenharia Mecânica, Avenida do Trabalhador, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP, e-mail: ajvp@sc.usp.br.

**Resumo.** *Apresenta-se uma sistematização de trabalhos científicos e grupos de pesquisa existentes sobre sistemas de guiagem e navegação autônomos de robôs e veículos agrícolas. Foram evidenciadas as principais metodologias e tecnologias empregadas em sub-sistemas de percepção, computação e atuação desses sistemas para veículos e robôs agrícolas. Os resultados foram organizados e confrontados com trabalhos de pesquisa em arquiteturas de comportamentos que têm sido pesquisadas e implementados com sucesso em outras áreas em sistemas autônomos. A sistematização permitiu criar uma documentação de referência para projeto e o desenvolvimento de plataformas onde poderão ser desenvolvidos e aprimorados diferentes algoritmos relativos à implementação de comportamentos para navegação e realização de tarefas autônomas em culturas agrícolas nacionais.*

**Palavra-chave:** robôs agrícolas, veículos autônomos, guiagem automática, navegação autônoma.

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de Veículos Agrícolas Autônomos (VAA's) e de Robôs Agrícolas Móveis (RAM's) na UE (Keicher & Seufert, 2000) e em países como EUA (Reid et al, 2000) e Japão (Torii, 2000) é vista como uma forte tendência e verifica-se um grande avanço em pesquisas nesta área. Um dos fatores que tem demandado estas pesquisas são a aplicação de novas práticas agrícolas como o Plantio Direto, a Agricultura de Precisão e as práticas que tomam em conta a proteção do meio ambiente. Estas práticas trouxeram uma série de desafios para a pesquisa, pois a escala de amostragem e a precisão exigidas, muitas vezes, são maiores que as exigidas pelas práticas agrícolas tradicionais (Auernhammer, 2001).

Junto a essa realidade relativamente recente, outros fatores, como o altíssimo custo de mão de obra, o envelhecimento da população rural sem perspectivas de renovação, a necessidade de minimizar a exposição dos operadores a atividades insalubres e a redução dos custos da eletrônica necessária para construção de tais sistemas, têm incentivado e justificado pesquisas em VAA's e RAM's por empresas como AGCO, John Deere e Yanmar e grupos como os apresentados em Keicher & Seufert (2000), Reid et al (2000) e Torii (2000). Trabalhos como Hague, Marchant & Tillett (2000) e Åstrand & Baerveldt (1999) têm apresentado soluções viáveis para o desenvolvimento de máquinas agrícolas semi-autônomas ou autônomas que possibilitam operações mais precisas para reduzir custos e minimizar o impacto ambiental de tarefas agrícolas, como a aplicação de agro-químicos. Porém Reid et al (2000) destaca que há um número limitado de

trabalhos direcionados ao desenvolvimento de sistemas com funções autônomas diversificadas capazes de atuarem em ambientes menos estruturados, adaptando-se às condições do campo para realização de tarefas diversas.

A realidade brasileira é muito diferente e a aplicação desse tipo de tecnologia parece estar muito mais distante. Pelo Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq (<http://lattes.cnpq.br>) verifica-se que em 2002 no Brasil não havia grupo desenvolvendo tecnologias neste tema para auxiliar a resolver os problemas do novo cenário da área agrícola. Essa situação põe o País numa posição cada vez mais de consumidor de tecnologia, que não raro é inadequada para o tipo de que agricultura que necessita. Posto isso, há no Brasil necessidade e motivação suficiente para iniciar trabalhos em VAA's e RAM's.

## **2. METODOLOGIA**

Foram pesquisados e sistematizados trabalhos existentes sobre VAA's e RAM's procurando explicitar as formas de implementação de sistemas de navegação nestes sistemas. Buscou-se um detalhamento dos estágios de percepção, computação e atuação, assim como os dispositivos sensores e atuadores com melhores resultados nas aplicações em questão. Os trabalhos pesquisados foram confrontados com trabalhos existentes em outras áreas da robótica, principalmente trabalhos recentes relacionados com abordagens de controle baseadas em comportamentos robóticos.

Além das publicações do meio acadêmico e científico, foi utilizada a *Internet* neste trabalho de pesquisa com o objetivo de conhecer os grupos de pesquisa e os trabalhos das diferentes instituições de pesquisa nessa área. Uma fonte que foi útil na pesquisa pela internet é a página do Technical Committee on Service Robots da IEEE Robotics and Automation Society (<http://www.service-robots.org/AgriculturalRobots.php>), que apresenta vários grupos de pesquisa na área de robótica aplicada à área agrícola e contém atalhos para páginas desses grupos de pesquisa.

## **3. GUIAGEM E NAVEGAÇÃO DE VAA'S E RAM'S**

Podem-se dividir os sistema de guiagem e navegação autônomas dos VAA's e RAM's encontrados na pesquisa bibliográfica em três estágios: percepção, computação e atuação. O foco das pesquisas em veículos e robôs agrícolas autônomos tem sido no estágio de percepção. Porém é crescente o número de trabalhos de pesquisa que buscam aprimorar o estágio de computação desses sistemas autônomos.

### **3.1. Estágios de percepção e atuação**

Na área agrícola destacam-se tecnologias e metodologias de guiagem e navegação autônomas que buscam integrar sensores diversos e que aproveitam algumas características estruturais do ambiente, como linhas de plantio.

Os principais dispositivos utilizados nesse estágio são: visão computacional (Visão de Máquina), receptor DGPS (Differential Global System Navigation ou Sistema de Posicionamento Global Diferencial) e sistema inercial (INS – Inertial Navigation System ou Sistema de Navegação Inercial) baseado em giroscópio ou GDS (Geomagnetic Direction Sensor ou Sensor Geomagnético de Direção) e em odômetros para medição de velocidade (intensidade e direção). A Tab. (1) apresenta grupos de pesquisa que vêm trabalhando há mais tempo e apresentam resultados consolidados que têm sido utilizados por grupos de pesquisa mais novos. Também, na Tab (1) são destacados os principais dispositivos de percepção utilizados e as metodologias desenvolvidas para integrar esses dispositivos.

Tabela 1. Grupos de pesquisa e sistemas utilizados para percepção em VAA's e RAM's

Grupos de Pesquisa	Sistemas de Percepção
Grupo de Pesquisa em Veículos Autônomos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade de Illinois-EUA (UIUC Agricultural Engineering: <a href="http://www.age.uiuc.edu/oree">http://www.age.uiuc.edu/oree</a> )	Filtro de Kalman Extendido para integrar DGPS, GDS e odômetro; visão computacional baseada na transformada de Hough para identificar linhas de plantio
Grupo de Robótica e Automação do Instituto de Pesquisa de Silsoe-Reino Unido (Silsoe Research Institute-SRI: <a href="http://www.sri.bbsrc.ac.uk/default.htm">http://www.sri.bbsrc.ac.uk/default.htm</a> )	Filtro de Kalman Extendido para integrar GDS e odômetro; visão computacional baseada na transformada de Hough para identificar linhas de plantio
Grupo de Pesquisa do Centro de Pesquisa Cemagref e do Grupo de Pesquisa do Laboratório de Automática e Eletrônica (LASMEA) da Universidade de Blaise Pascal, ambos em Clermont-Ferrand-França (CEMAGREF: <a href="http://www.cemagref.fr/English">http://www.cemagref.fr/English</a> )	Filtro de Kalman Extendido para integrar DGPS, GDS, radar <i>Doppler</i> ou DGPS, giroscópio e radar <i>Doppler</i> ; visão computacional baseada na transformada de Hough para identificar linhas de plantio
Grupo de Engenharia de Sistemas de Veículos Agrícolas da Faculdade de Agricultura da Universidade de Hokkaido em Sapporo-Japão (AVSE: <a href="http://avse.bpe.agr.hokudai.ac.jp/index.html.en">http://avse.bpe.agr.hokudai.ac.jp/index.html.en</a> )	Combinação de RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS), GDS e gisocópio (FOG - Fiber Optic Gyroscope) em um sistema de alta precisão; inteligência artificial para integrar DGPS e GDS,
Grupo de Percepção Artificial do Instituto de Automática Industrial do Conselho Superior de Investigações Científicas em Arganda del Rey – Madri/Espanha (GPA-IAI/CSIS: <a href="http://www.iai.csic.es/users/gpa">http://www.iai.csic.es/users/gpa</a> )	Arquitetura de comportamentos para controle de guiagem e navegação e para realização de tarefas diversificadas utilizando dispositivos como DGPS, GDS e odômetro

Dois parâmetros que influenciam fortemente a elaboração de um sistema de percepção e consequentemente todo o sistema robótico são custo e precisão. Sistemas agrícolas autônomos de alta precisão podem ser obtidos com sistemas de percepção baseados em dispositivos de alto custo, como o robô desenvolvido pelo grupo de Hokkaido, apresentado na Tab. (1), que é capaz de realizar diversas tarefas como fertilização e colheita, utilizando percepção baseada em RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS ou GPS de Cinemática em Tempo Real) e FOG (Fiber Optical Gyroscope ou Giroscópio de Fibra Ótica).

Em geral quanto mais preciso, mais caro será o sensor e mais caro será o sistema. Assim o que se tem buscado são sistemas que potencializam as boas características dos sensores utilizados e minimizam a influências de suas deficiências, para que se possam utilizar sensores menos precisos e mais baratos. Nesse sentido diversas soluções têm sido pesquisadas e apresentadas e dentre elas as mais comuns são as buscam a fusão de sensores, ou seja, a integração das informações de sensores antes do processamento a ser realizado pelo estágio de computação.

Os dispositivos do estágio de atuação geralmente utilizam a estrutura hidráulica ou pneumática da máquina agrícola em que os sistemas de guiagem e navegação são implementados.

### 3.1.1. Filtro de Kalman e integração de sensores

Uma das soluções bastante utilizadas para integração ou fusão das informações dos sensores é a ferramenta matemática conhecida Filtro de Kalman (FK). O FK é um estimador utilizado para

estimar o estado de um sistema dinâmico linear perturbado por um Ruído Branco Gaussiano, usando medidas que são funções lineares do estado do sistema, mas corrompidas por um Ruído Branco Gaussiano aditivo. Modelos matemáticos derivados de FK constituem representações razoáveis para muitos problemas práticos, incluindo problemas de controle e problemas de estimação. O Filtro de Kalman Estendido (FKE) é uma aplicação do FK a problemas não lineares, através da linearização do sistema em torno de um ponto.

Stombaugh, Benson & Hummel (1998), pesquisadores do grupo de Illinois apresentado na Tab. (1), utilizaram um RTK-GPS para navegação baseada em mapa de uma área de trabalho gerado anteriormente. Com este sistema de percepção o erro obtido na tarefa de seguir as linhas definidas a partir dos dados do mapa foi 16 cm em uma velocidade de operação de 4,5 m/s. Pesquisadores do mesmo grupo obtiveram um erro de 8,4 cm utilizando um sistema de percepção com RTK-GPS e GDS integrados através de fusão de sensores utilizando método baseado em FKE (Noguchi et al, 1998 apud Reid et al, 2000).

Outro trabalho do grupo de Illinois apresentado em Benson et al (1998) apud Reid et al (2000), mostra que com um sistema com GDS e um receptor GPS com precisão inferior a um receptor RTK-GPS, integrados por fusão de sensores baseada em FKE, pode-se obter um erro menor que o erro de 16 cm obtido com o sistema de percepção baseado somente em um RTK-GPS. Este trabalho, dependendo da aplicação e precisão desejadas, pode ser uma interessante referência, pois um inconveniente em utilizar um sistema RTK-GPS é o alto custo de tal sistema, que custa em torno de 150 mil US\$ (cotação realizada no primeiro semestre de 2003). Já um sistema com um receptor DGPS mais simples (precisão menor) e um GDS custará menos (AgDGPS-114 da Trimble custa em torno de 10 mil US\$ e GDS Vector 2X da PNI2 Corporation com especificações igual aos utilizados nos trabalhos pesquisados tem custo inferior a 500 US\$).

Le Bars et al (1997), pesquisadores do grupo de Clermont-Ferrand, apresentado na Tab. (1), realizam uma comparação entre estágio de percepção composto por DGPS, outro composto por radar doppler (medição de velocidade pelo efeito doppler), GDS e receptor DGPS e outro composto por radar *doppler*, giroscópio (medição de aceleração) e receptor DGPS. Nos dois sistemas com diferentes sensores foi utilizado FKE para fusão de sensores e os resultados permitiram verificar que, sob as condições em que os testes foram realizados, a combinação entre radar *doppler*, GDS e receptor DGPS apresentou maior precisão na tarefa de guiagem e navegação autônoma.

### 3.1.2. Sistema de visão

A visão computacional constitui uma das tecnologias emergentes aplicadas a guiagem e navegação autônomas VAA's e RAM's. Porém em ambientes abertos, como o ambiente agrícola, há uma série de desafios a serem superados para implementação de um sistema de visão, em relação aos sistemas autônomos que operam em ambiente fechados.

No ambiente agrícola a luminosidade apresenta uma variabilidade espacial e temporal acentuada e também apresenta barreiras físicas que são menos previsíveis que ambientes fechados. Dependendo das condições climatológicas e do horário do dia a luminosidade se altera alterando os perfis de sombras. Também, embora a estrutura de linhas de plantio seja relativamente estruturada, falhas nessas linhas, finais de linhas ou corpos estranhos não são incomuns. Assim, fatores como estes tem levado à adoção de câmeras mais apropriadas do que as câmeras para computadores pessoais (*webcam*), muito utilizadas em robôs e veículos autônomos para ambientes fechados. Também é comum a utilização de computadores dedicados ou até mesmo a utilização de placas de aquisição e processamento de imagens especiais como as *framegrabbers*, para se obter sistemas visão com capacidade de processamento para operar em tempo real.

No trabalho de revisão de Keicher e Seufert (2000) sobre veículos agrícolas autônomos na Europa é apresentado o trabalho de Keicher et al. (1998) em que foi desenvolvido um sistema de visão para navegação autônoma de um trator. Este sistema era constituído de um computador PC

com frequência do processador de 300 MHz dedicado, uma placa framegrabber e uma câmera CCD RGB. O sistema de controle em tempo real operando a 180 MHz era obtido com o sistema de visão operando a uma taxa de aquisição de imagem de 50 FPS (50 *frames per second* – 50 quadros por segundo ou 50 Hz) e resolução de 768x572 pixels, para se ter uma precisão de 5 cm com o trator deslocando-se a uma velocidade de 12 km/h. Neste sistema de visão não seria possível a utilização de uma webcam, pois as webcam's encontradas normalmente no mercado chegam ao máximo de 30 FPS com resolução de 360x280 (resoluções maiores são obtidas em taxas de aquisição menores).

Em Astrand e Baerveldt (1999) é relatado o desenvolvimento de um robô móvel para atuar em plantações de beterraba. Neste trabalho o sistema de visão utilizado era composto de um PC dedicado com frequência do processador de 333 MHz, uma placa framegrabber e uma camera CCD. O sistema de visão operava de 8 a 12 FPS para atender ao sistema de controle de navegação que permitia ao veículo atingir uma velocidade de 2 km/h e com precisão de 45 cm.

Como se pode observar o desempenho do sistema implementado por Astrand e Baerveldt (1999) (2 km/h e 45 cm) é inferior ao sistema apresentado por Keicher et al. (1998) apud Keicher e Seufert (2000) (12 km/h e 5 cm). Isto acontece porque a velocidade de operação do veículo e a precisão de na navegação estão relacionados com a capacidade de resposta do sistema, que nos dois casos dependem do sistema de visão. Quanto menor o tempo de resposta melhor a precisão e/ou mais rápido o veículo pode operar e vice-versa.

No trabalho de Astrand e Baerveldt (1999) a taxa de aquisição de imagem requerida (12 FPS) permitiria a utilização de uma webcam, porém nesse trabalho foi utilizado um artifício que seria difícil de ser conseguido com uma webcam: o filtro de infravermelho da câmera utilizada foi retirado e foi adaptada à câmera uma lente de filtragem da banda visível permitindo assim utilizar o sistema de visão na escala de infravermelho próximo. A vantagem desse artifício é que a diferença entre a vegetação e o solo se acentua e os efeitos negativos das variações de luminosidades causados por sombras diminuem na faixa do infravermelho próximo, permitindo a identificação mais clara das linhas de plantio.

A adaptação de câmeras para a faixa de infravermelho próximo tem sido muito aplicada em trabalhos que utilizam visão para guiagem e navegação autônoma de máquinas agrícolas. O grupo de pesquisa de Illinois, apresentado anteriormente na Tab (1), foi um dos pioneiros na utilização desta técnica associada à utilização de algoritmos baseados na Transformada de Hough (TH) para detecção de linhas de plantio que passou a ser utilizada por outros grupos (Reid et al., 2000).

A TH é uma ferramenta utilizada para detectar características analiticamente representáveis em imagens binarizadas, assim como linhas, círculos e elipses. Em geral, a transformada é aplicada após a imagem sofrer um pré-processamento, em usualmente a detecção de bordas. A Fig. (1) mostra o resultado obtido na identificação de linhas de plantio através da HT.

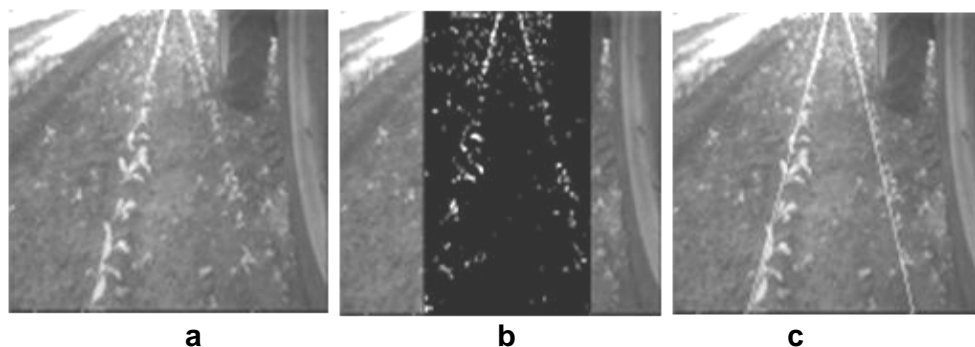


Figura 1. Identificação de linhas de plantio em imagens através da HT. (a) Imagem digital, (b) trecho da imagem tratada e (c) sobreposição do trecho de imagem onde foi aplicado HT com a imagem original (Halmstad, 2003)

Outro recurso que câmeras mais simples não possuem e que é muito utilizado em sistemas de visão para área agrícola é o obturador eletrônico, também conhecido como *shutter* eletrônico. O *shutter* eletrônico é um sistema eletrônico para controle automático do tempo de exposição do elemento sensor CCD durante o qual a luz está sendo convertida em carga elétrica e acumulada em um pixel. Nos trabalhos Hague, Marchant & Tillett (2000) é descrito o uso do controle automático do tempo de exposição para obter-se o máximo de contraste entre o solo e a planta sem que ocorra saturação do elemento CCD em ambientes com variação de luminosidade.

O número de trabalhos de pesquisa onde o sistema de visão é utilizado não só para guiagem e navegação é crescente. Nesses trabalhos o sistema de visão é compartilhado para fornecer também dados para sistemas responsáveis por outras tarefas agrícolas. Verifica-se em tais trabalhos a necessidade de utilização de câmeras com melhores recursos assim como a utilização de placas framegrabber e de computadores dedicados. Um exemplo dessa aplicação é o trabalho de Sanchiz et al. (1998) que utiliza a visão para navegação e para construção de mapa. Nesse trabalho são utilizados um sistema de visão com uma câmera (na faixa de infravermelho próximo) e uma placa framegrabber capturando imagens a 10 FPS (10 Hz) que alimentam dois módulos de processamento com imagens com resolução de 128x256: um para a identificação de linha de plantio e navegação e outro para a construção de mapas. Mesmo com este sistema de visão mais sofisticado a velocidade máxima de operação alcançada pelo veículo autônomo foi de 1 m/s (3,6 km/h).

### 3.2. Estágio de computação

Verifica-se que a grande maioria dos trabalhos de pesquisa para desenvolvimento de VAA's e RAM's utiliza modelos cinemáticos simples para o estágio de computação. Porém trabalhos recentes tentam aplicar conceitos de robótica e de veículos autônomos de outras áreas de pesquisa para aprimorar o estágio de computação e permitir o desenvolvimento de VAA's e RAM's com capacidade de adaptar-se a diferentes condições do campo.

#### 3.2.1. Sistemas de guiagem com ênfase no estágio de percepção

No processo de guiagem dos VAA's e RAM's os dados de sensores são combinados através de algum método, como FKE, e aplicados a um modelo matemático do sistema móvel. O modelo gera saídas que são normalmente o ângulo de guiagem e o deslocamento lateral que alimentam o estágio de atuação. A Fig. (2) ilustra sistema de coordenadas para o sistema com as definições para ângulo de guiagem e deslocamento lateral, como tem sido utilizado na maioria dos trabalhos pesquisados.

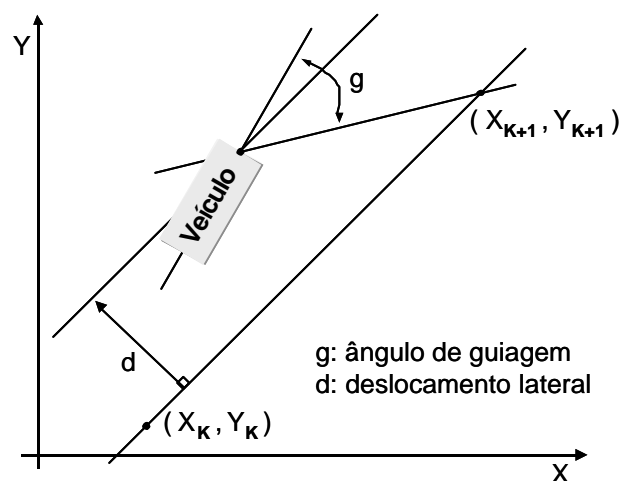


Figura 2. Ilustração de sistemas de coordenadas para sistema de guiagem e navegação adaptada de Noguchi, Ishii & Terao (1997)

A precisão obtida pelos diferentes sistemas autônomo que utilizam o processo de guiagem anteriormente descrito tem se mostrado suficiente para permitir a guiagem autônoma para tarefa de navegação VAA's e RAM's. Porém na grande maioria desses trabalhos, a ênfase dada ao estágio de percepção conduz a utilização de sensores de custo elevado como RTK-GPS.

Dentre os grupo apresentado na Tab. (1) anteriormente, destaca-se um trabalho interessante tem sido desenvolvido pelo grupo de Silsoe. Observa-se nos trabalhos pesquisados do grupo que o receptor GPS é utilizado apenas para tarefa de aplicação de agroquímicos, ou seja, não é utilizado na tarefa de navegação. Esta pode ser uma referência interessante, pois os resultados mostram que é possível realizar navegação sem receptor GPS, criando uma possibilidade a mais a ser analisada no desenvolvimento de percepção para um sistema de guiagem e navegação autônoma. Em diferentes trabalhos publicados pelo grupo, como em Sanchiz et al (1998) e Hague, Marchant & Tillett (2000), é possível observar que a utilização de sistema de visão computacional com câmera CCD e lentes para infravermelho próximo para obter o angulo de guiagem e o deslocamento lateral a partir da identificação das linhas de plantio pela TH e de um modelo cinemático. No intervalo em que uma imagem é adquirida e analisada, o modelo cinemático e os dados de odometria e direção (GDS) são combinados através de FKE para estimar a posição do veículo e guiá-lo.

Porém, no trabalho do grupo de Silsoe assim como nos diversos trabalhos pesquisados, os VAA's e RAM's necessitam de ambientes relativamente estruturados para a navegação e também possuem limitações para realizar tarefas autônomas diversificadas. A abordagem baseada na ênfase do estágio de percepção e a utilização de modelos que centralizam os dados dos sensores tornam difícil o incremento desses sistemas no sentido de superar as deficiências apontadas. Esse tipo de abordagem utiliza conceitos que a situam num tipo de abordagem para desenvolvimento de robôs, denominado *Abordagem Deliberativa*.

Em outras áreas da robótica são conhecidos os problemas da abordagem deliberativa para determinadas aplicações e outras abordagens têm sido desenvolvidas para superar essas deficiências. Diante disso alguns trabalhos recentes buscam aplicar conceitos de robótica e de veículos autônomos de outras áreas de pesquisa, assim como desenvolver novos conceitos, para o desenvolvimento de VAA's e RAM's. Um exemplo desse tipo de aplicação é apresentado em Torii (2000) que destaca pesquisas no Japão em inteligência artificial (Lógica Difusa, Redes Neurais e Algoritmo Genético) aplicadas ao processamento sinais de sensores e aplicadas a controle de navegação de VAA's e RAM's. Outro trabalho com resultados interessantes é o trabalho descrito em Garcia-Alegre et al (2001) que utiliza uma arquitetura híbrida baseada em comportamentos robóticos.

### **3.2.1. Abordagem baseada em comportamentos**

Uma arquitetura provê princípios de organização de um sistema de controle. As diversas linhas de pesquisa em arquitetura de robôs podem ser agrupadas em duas abordagens: *a deliberativa e a reativa*. Trabalhos relativamente recentes utilizam benefícios dessas duas arquiteturas e buscam desenvolver *Arquiteturas Híbridas*, cuja parte deliberativa é responsável pela construção de planos para execução de tarefas complexas e a parte reativa é responsável por reações rápidas em resposta a variações do meio (Murphy, 2000).

Outro conceito que esta presente em muitos trabalhos de pesquisa em robôs é o conceito de *Comportamento*, que são entidades que compõem uma arquitetura e relacionam de diferentes formas entradas de sensores à saídas de atuação de acordo com as tarefas a serem executadas e o contexto apresentado pelo meio de atuação do robô em cada instante. Os comportamentos podem competir ou cooperar para realização de uma tarefa, além disso, um comportamento pode utilizar mais de um sensor e diferentes comportamentos podem utilizar sensores em comum através de

fusão sensorial (Murphy, 2000). A Fig. (3) apresenta um exemplo de estrutura de uma arquitetura híbrida baseada em comportamentos.

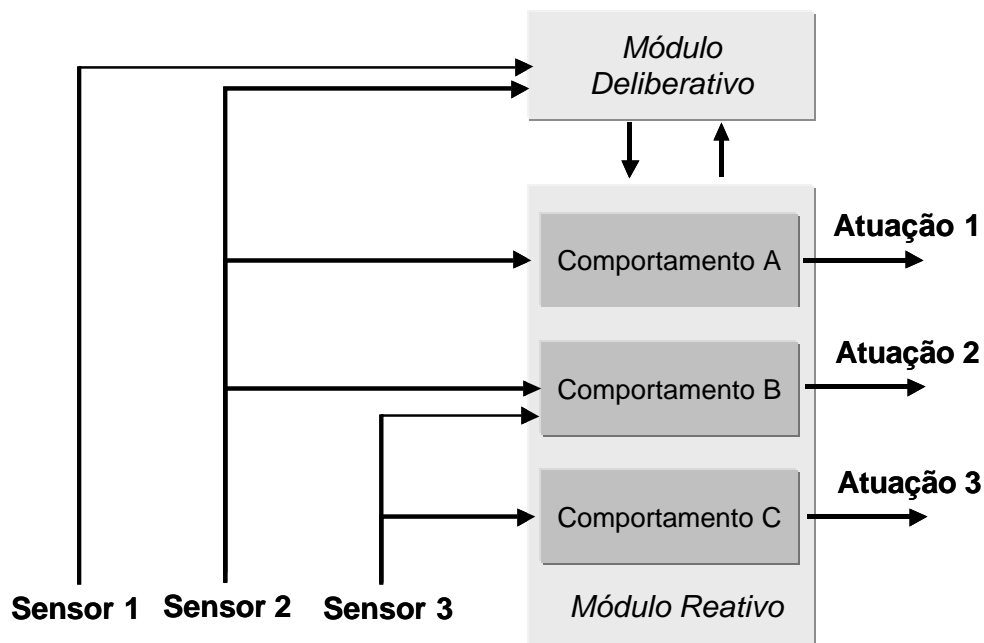


Figura 3. Exemplo de uma arquitetura híbrida de robô baseada em comportamentos

Dentre os trabalhos pesquisados na área agrícola destaca-se o trabalho do grupo de Arganda Del Rey apresentado na Tab. (1). Garcia-Alegre & Recio (1998) e Garcia-Alegre et al (2001) descrevem uma arquitetura híbrida baseada em comportamentos robóticos, denominada AMARA, que foi desenvolvida e vem sendo aperfeiçoada pelo grupo. A arquitetura é baseada em uma hierarquia de comportamentos para atuação em ambiente agrícola. Os comportamentos são combinados em grupos para realização de determinadas tarefas. Por exemplo, para tarefas de navegação relacionadas com um nível de abstração menor são definidos comportamentos como: Start\_Stop, Turn\_Left, Turn\_Right, Forwards e Backwards. Para tarefas com um nível de abstração intermediário são definidos comportamentos como: Go\_To\_Position, Avoid e Align. Para níveis de abstração superiores são definidos comportamentos como: Go\_Home e Go\_To\_Olives.

A arquitetura híbrida desenvolvida foi implementada em um pequeno trator-robô que foi denominado Rojo. Garcia-Alegre et al (2001) descreve experimentos com a execução de planos de navegação baseados em mapa construído externamente e enviados através de enlace de rádio ao robô. Utiliza-se para isso um receptor DGPS, odômetros e um GDS no estágio de percepção do robô e um sistema eletro-pneumático desenvolvido para o estágio de atuação. O robô executa a tarefa com erro inferior a 50 cm.

#### 4. CONCLUSÕES

Os trabalhos de pesquisa em sistemas de guiagem e navegação autônomas de VAA's RAM's tem tido considerável avanço. Porém algumas metodologias e tecnologias apresentadas nesses trabalhos utilizam abordagens deliberativas e focadas no estágio de percepção que se demonstram insuficientes para o desenvolvimento de sistemas versáteis para atuar no ambiente agrícola pela quantidade grande de fatores a serem previstos e pelas características aleatórias do ambiente agrícola. Assim novas abordagens e conceitos já consolidados em outras áreas têm um grande potencial de aplicação a ser explorado na área agrícola, como por exemplo, as arquiteturas robóticas híbridas e os sistemas baseados em comportamentos.



Os resultados desta pesquisa constituem uma documentação de suporte às pesquisas e ao desenvolvimento de sistemas de guiagem e navegação autônomas para VAA's RAM's, não só para aquisição de dados no campo, mas para realização de outras práticas agrícolas. A documentação gerada é também uma contribuição ao desenvolvimento de grupos nacionais de pesquisa nessa área e ao desenvolvimento de sistemas que possibilitam a construção e utilização de VAA's RAM's com características próprias para as culturas nacionais, como café, cana, soja e citrus.

## 6. REFERÊNCIAS

- Åstrand, B.; Baerveldt, A. J. Mechatronics in Agriculture - robust recognition of plant rows. The 2nd International Conference on Recent Advances in Mechatronics, ICRAM'99, Istanbul, Turkey, May 24-26, 1999, p. 135-141, 1999.
- Auernhammer, H. Precision farming — the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture*. v. 30, n. 1-3, p. 31 - 43, 2001.
- Benson, E.; Stombaugh, T.; Noguchi, N.; Will, J.; Reid, J.F. An evaluation of a geomagnetic direction sensor for vehicle guidance in precision agriculture applications. ASAE Paper 983203. ASAE. St. Joseph, MI. 1998.
- Garcia-Alegre, M.C.; Recio, F. "Basic Visual and Motor Agents for Increasingly Complex Behavior Generation on a Mobile Robot". *Autonomous Robot* Vol. 5, pp. 1-10. 1998
- Garcia-Alegre, M.C., Ribeiro, A., Garcia-Perez, L., Martinez, R., Guinea, D., Autonomous robot in agriculture tasks, Third European Conference on Precision Agriculture, 18 a 20 de junho de 2001, Montpellier, França, p. 25-30, 2001
- Hague, T.; Marchant, J.A.; Tillet, N.D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*. Amsterdam, v. 25, n. 1-2, p. 11-28, 2000.
- Halmstad University (2003). <http://www.hh.se/staff/bjorn/mech-weed>. (Apr.).
- Keicher, R.; Seufert, H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture*. v. 25, n. 1-2, p. 169-194, 2000.
- Le Bars, J.M.; Boffety, D.; Trassoudaine, L.; Alizon, J.; Imberbis, C. Location improvement by combining a DGPS system with on-field vehicle sensors. Precision Agriculture '97. Volume II: Technology, IT and Management. Papers presented at the First European Conference on Precision Agriculture, Warwick, UK, 7-10 September 1997, edited by STAFFORD, J. V. Oxford, UK: BIOS Scientific Publishers Ltd, 585-591. 1997.
- Murphy, R. Introduction to AI robotics. MIT Press. 2000.
- Noguchi, N.; Ishii, K.; Terao, H. Development of a agricultural mobile robot using a geomagnetic direction sensor and image sensors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v. 67, p. 1-15, 1997.
- Noguchi, N.; Reid, J.F.; Benson, E.; Will, J.; Stombaugh, T. Vehicle automation system based on multi-sensor integration. ASAE Paper 983111. ASAE, St. Joseph, MI. 1998
- Reid, J.F.; Zhang, Q; Noguchi, N.; Dickson, M. Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agriculture*. vol. 25, n.1-2, p. 155-167, 2000.
- Sanchiz, J.M.; Marchant, J.A.; Pla F.; Hague, T. Real-time visual sensing for task planning in a field navigation vehicles. *Real-Time Imaging*, Academic Press Limited, n. 4, p. 55-65, 1998, article no.: ri960063.
- Stombaugh, T., Benson, E., Hummel, J.W., 1998. Automatic guidance of agricultural vehicles at high field speeds. ASAE Paper 983110. St. Joseph, MI.
- Torii, T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan. *Computers and Electronics in Agriculture*. v. 25, n. 1-2, p. 133-153, 2000.

# **GUIDANCE AND NAVIGATION SYSTEM: AN APPROACH FOR THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS AGRICULTURAL ROBOTS AND VEHICLES**

**Rafael Vieira de Sousa**

Escola de Engenharia de São Carlos - USP / Embrapa Instrumentação Agropecuária, R. XV de Novembro, 1452, Centro, CEP 13560-970, São Carlos, SP, e-mail: rafael@cnpdia.embrapa.br.

**Ricardo Yassushi Inamasu**

Embrapa Instrumentação Agropecuária, R. XV de Novembro, 1452, Centro, CEP 13560-970, São Carlos, SP, e-mail: ricardo@cnpdia.embrapa.br.

**Arthur José Vieira Porto**

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Depto. de Engenharia Mecânica, Avenida do Trabalhador, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP, e-mail: ajvp@sc.usp.br.

**Abstract.** *This paper presents a systematization of scientific works and research groups on autonomous systems for guidance and navigation of agricultural robots and vehicles. It was possible to evidence the main methodologies and technologies used in the subsystems of perception, computation and actuation of these types of systems. The results were organized and discussed under the view of the application of behavior-based systems on autonomous agricultural systems. This work allowed generating a reference documentation to guide researches and developments on autonomous systems based on behavior for agricultural tasks.*

**Keywords:** *agricultural robots, autonomous vehicles, automatic guidance, autonomous navigation*