

Modelagem, Visualização e Simulação de Manipuladores Mecânicos

Anderson Maciel Departamento de Informática – Universidade de Caxias do Sul Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 Caxias do Sul - RS – 95070-560 - Brasil +55 054. 212.1133 Sonni@zaz.com.br	Gilda Aparecida de Assis Departamento de Informática – Universidade de Caxias do Sul Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 Caxias do Sul - RS – 95070-560 - Brasil +55 051.286.4708 gaassis@ucs.tche.br	Ricardo Vargas Dorneles Departamento de Informática – Universidade de Caxias do Sul Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 Caxias do Sul - RS – 95070-560 - Brasil +55 054.212.1133 rvdornel@ucs.tche.br
---	--	--

1. RESUMO

Este artigo apresenta os principais aspectos referentes à modelagem, visualização e simulação de manipuladores mecânicos no projeto ASIMOV.

O ASIMOV é um ambiente educacional integrado para o desenvolvimento e simulação de manipuladores mecânicos.

São apresentados e discutidos os critérios utilizados na seleção das técnicas para as etapas de modelagem, visualização e simulação. Também são descritos os recursos de *rendering* e detecção de colisões, implementados no sistema ASIMOV.

São descritos os principais resultados obtidos com o sistema ASIMOV e as perspectivas futuras para o projeto.

2. PALAVRAS-CHAVE

Ambientes Educacionais, CAD, Computação Gráfica, Detecção de Colisões, Manipuladores Mecânicos, *Rendering*, Robótica, Simulação.

3. INTRODUÇÃO

O ASIMOV é um ambiente educacional integrado para auxiliar no projeto e simulação de manipuladores mecânicos. O projeto ASIMOV utiliza técnicas de especificação de movimento (simulação) baseadas em modelos cinemáticos.

Um manipulador mecânico é uma máquina programável de propósito geral. Os manipuladores são comparáveis, quanto à forma e capacidade de movimento, ao braço humano. Estes manipuladores executam atividades industriais rotineiras, como pintura, montagem, carga, etc.

Há uma variedade de ferramentas de software para o projeto e simulação de manipuladores mecânicos. Usualmente, estas ferramentas são voltadas para etapas específicas do projeto e não são integradas [12]. Neste contexto, o projeto ASIMOV foi desenvolvido de forma a promover a integração de recursos computacionais que auxiliem o projeto e simulação de manipuladores mecânicos. Os recursos computacionais disponibilizados pelo ASIMOV são agrupados nos seguintes módulos:

- ✍ Módulo de Base de Dados de Componentes;
- ✍ Módulo de CAD;
- ✍ Módulo de Simulação;
- ✍ Módulo de Programação;
- ✍ Módulo de Ensino.

O módulo de base de dados de componentes é a fonte de dados para os demais módulos do projeto ASIMOV. Neste sentido, foi construída uma interface entre o Sistema Gerenciador de Banco de Dados utilizado e os demais módulos do sistema ASIMOV. O Sistema Gerenciador de Banco de Dados utilizado na implementação é o SGBD ORACLE, que opera em uma arquitetura cliente-servidor. Estão disponíveis na base de dados de componentes alguns modelos de manipuladores industriais bastante utilizados como os modelos Puma, Pantográfico e Esférico.

O módulo de programação apresenta recursos para a edição e interpretação de programas escritos na linguagem VAL-II e para a programação gráfica da simulação do manipulador mecânico.

O módulo de ensino é o responsável pela caracterização do ASIMOV como ambiente educacional. Atualmente, este módulo apresenta uma ajuda interativa para a utilização do sistema e um tutor inteligente que aborda conhecimentos de hidráulica, necessários para a construção de manipuladores mecânicos.

O módulo de CAD consiste de rotinas para a criação, visualização e manipulação dos manipuladores mecânicos. O módulo de CAD importa objetos no formato DXF¹ e armazena as informações contidas nestes arquivos na base de dados de componentes. Uma vez que os objetos estejam armazenados na base de dados, eles podem ser carregados para a memória principal e, a partir de técnicas de visualização 3-D, são exibidos na tela do computador. As rotinas de manipulação permitem a construção geométrica dos manipuladores utilizando-se a técnica de justaposição de elementos primitivos. Alguns dos elementos geométricos primitivos disponíveis no ASIMOV são o cone, o cilindro e o tronco de pirâmide. O módulo de CAD também permite que seja definida a estrutura hierárquica das partes (peças) que compõem o manipulador.

O módulo de simulação é o responsável pela simulação do funcionamento do manipulador a partir do modelo geométrico adotado. Este módulo interpola os pontos gerados pelo módulo de programação, obtendo vários pontos intermediários. A cinemática inversa é aplicada a partir dos pontos produzidos pelo módulo de simulação. A cinemática inversa produz como resultado todos os deslocamentos e rotações que devem ser aplicados nas juntas do manipulador para que ele se mova suavemente até o alvo.

Este trabalho apresenta a descrição em detalhes das técnicas de modelagem, visualização e animação presentes nos módulos de CAD e Simulação. A figura 1 representa a estrutura geral do sistema ASIMOV. As elipses localizam os módulos de CAD e Simulação dentro da estrutura geral do sistema ASIMOV.

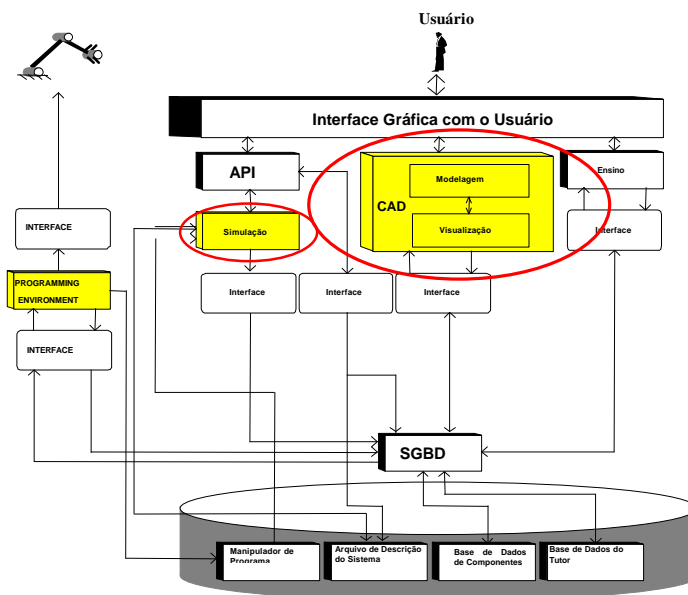


Figura 1 – Arquitetura básica do projeto ASIMOV [12]

Este artigo está organizado da seguinte forma. A seção 4 apresenta uma visão geral da estrutura de dados básica do ASIMOV. Na seção 5 são apresentadas as operações de modelagem incluídas no módulo de CAD. A seção 6 descreve as operações de visualização 3D que são utilizadas nos módulos de CAD e Simulação. A seção 7 apresenta uma visão geral do módulo de Simulação. Na seção 8 a técnica de *rendering* é descrita. A seção 9 descreve a detecção de colisões. A seção 10 apresenta aspectos da implementação do sistema ASIMOV. A seção 11 apresenta as principais conclusões sobre o projeto. As propostas de trabalhos futuros são apresentadas na seção 12.

4. REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA E HIERÁRQUICA DOS MANIPULADORES MECÂNICOS

Esta seção descreve a estrutura de dados utilizada para representar os manipuladores mecânicos no projeto ASIMOV.

O projeto ASIMOV necessita de uma estrutura de dados capaz de representar os elementos geométricos em três dimensões, o agrupamento destes elementos em um complexo sistema hierárquico, as informações físicas destes elementos como massa e momento de inércia, as informações necessárias ao mecanismo de visualização 3D como dimensões da janela, posição da câmara sintética e ângulos de abertura da câmara sintética e todas as informações relacionadas à simulação de movimentos como a posição e orientação do alvo.

¹ Drawing Interchange File

A estrutura geométrica dos manipuladores mecânicos é composta de vértices, que aos pares formam arestas. Estas arestas são agrupadas para formar faces. As faces, por sua vez, são agrupadas para formar poliedros convexos. Cada um destes poliedros é denominado objeto ou elemento primitivo (figura 2).

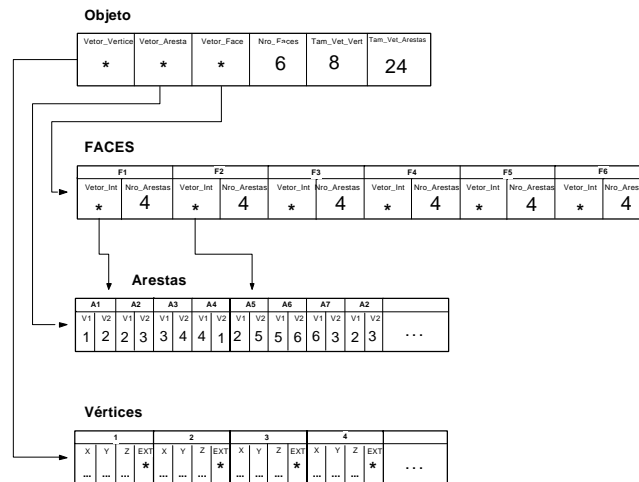


Figura 2 – Estrutura geométrica de um objeto primitivo no ASIMOV [11]

Os objetos primitivos são agrupados para formar as peças. Cada um dos objetos primitivos de uma peça é descrito no sistema de referência cartesiano da peça. Os objetos primitivos de uma peça não têm movimento relativo entre si. A estrutura geométrica de um manipulador mecânico é constituída de um conjunto limitado de peças.

O movimento de uma peça relativo às outras peças que compõem o manipulador é definido através de uma estrutura hierárquica. As peças são identificadas por números inteiros. A primeira peça (*ground*) é fixa no sistema de referência do universo e portanto não se move.

A maioria dos robôs industriais são articulados. Eles são articulados através de juntas de revolução ou de translação. Apenas um conjunto de peças não define uma hierarquia, é necessário também criar um conjunto de juntas ou articulações. Os identificadores das juntas também são inteiros. Cada junta relaciona duas peças. As peças relacionadas por uma junta são discriminadas como peça fixa, a de menor identificador, e peça móvel, a de maior identificador. Quando uma junta se move, é a peça móvel e seus objetos primitivos que se movem. Por exemplo, se o manipulador mecânico representa o braço humano, a junta correspondente ao ombro humano moveria o braço (peça móvel) mas deixaria o antebraço imóvel, o que não é desejado. Portanto, é necessário utilizar um mecanismo para relacionar as juntas entre si.

O método desenvolvido por Denavit e Hartenberg [2], [5] é utilizado para estabelecer uma inter-relação entre as juntas. Este método foi escolhido para a representação das estruturas articuladas por se tratar de um formalismo consolidado, adotado como padrão por diversos algoritmos de corpos articulados. O método de Denavit e Hartenberg descreve a cinemática de cada articulação através da definição de um sistema cartesiano de referência localizado em cada junta do manipulador. O sistema de coordenadas de cada junta é associado ao sistema de coordenadas da junta antecessora na hierarquia de juntas. A partir disto, são definidos quatro parâmetros que determinam uma matriz de transformação linear, a matriz DH. Esta matriz estabelece a relação entre juntas consecutivas. Dessa forma, uma alteração na disposição de uma junta alteraria sua matriz DH e, conseqüentemente, alteraria a disposição de todas as juntas posteriores a ela na hierarquia. O método de Denavit e Hartenberg possibilita que todas as transformações de um sistema de coordenadas de junta para outro sistema de coordenadas de junta sejam concatenadas para formar uma única transformação, de forma a permitir a representação dos elementos que compõem o manipulador em um único sistema de referência. A equação 1 apresenta a matriz DH que relaciona o sistema de coordenadas n com o sistema de coordenadas $n-1$.

$${}^{n-1}A_n = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & \cos\theta_n \sin\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \cos\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Equação 1 – O parâmetro a_n é a menor distância entre os eixos Z_{n-1} e Z_n ; o parâmetro θ_n é o ângulo entre os dois eixos de junta; o parâmetro α_n é o ângulo entre as duas articulações e o parâmetro d_n é a distância que separa as duas normais ao longo do eixo da junta n .

5. MODELAGEM

O módulo de CAD permite a construção do manipulador através de técnicas de modelagem geométrica por justaposição de objetos primitivos. Os objetos primitivos disponíveis no ASIMOV são tronco de pirâmide, tronco de cone, cilindro, paralelepípedo e cone. O usuário inicia a modelagem a partir de um sistema de coordenadas inercial, conhecido como SRU- sistema de coordenadas do universo. O SRU é um sistema de referência orientado pela mão direita, como mostra a figura 3.

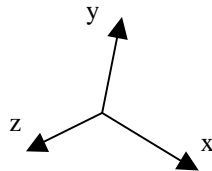


Figura 3 – SRU – Sistema de Referência do Universo

Os objetos primitivos podem ser instanciados através das seguintes operações de manipulação implementadas no sistema:

- ?? Translação;
- ?? Rotação;
- ?? Escala.

Estas operações podem ser utilizadas para definir a posição, a dimensão e para orientar os objetos primitivos do manipulador mecânico.

Após a criação e instanciamento dos objetos primitivos, pode-se definir as peças que compõem o manipulador mecânico. Para isso são definidos sistemas de referência de peça. Cada sistema de referência de peça deve ter pelo menos um objeto associado. Os objetos são selecionados com o mouse e a seleção de peças é feita através da seleção do sistema de referência cartesiano da peça. As operações de manipulação também podem ser aplicadas às peças do manipulador mecânico.

Faz-se uso de quatro vistas diferentes para a construção geométrica dos manipuladores mecânicos. Destas janelas de exibição três resultam das projeções ortográficas paralelas (frontal, superior e lateral) e uma tem sua origem na projeção perspectiva. Na vista perspectiva o usuário define os atributos de uma câmara sintética para visualizar o manipulador mecânico de diferentes posições do universo. A Figura 4 mostra as quatro vistas de um manipulador mecânico no ASIMOV.

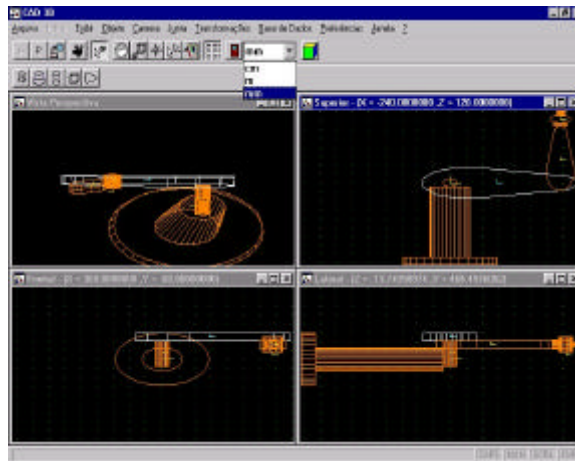


Figura 4 – Tela do Módulo de CAD do sistema ASIMOV. Tem-se na figura as quatro vistas do manipulador que está sendo modelado: perspectiva, superior, frontal e lateral.

6. VISUALIZAÇÃO

O processo de visualização no ASIMOV consiste em operações de visualização 3D. Estas operações podem ser divididas em duas classes:

- ?? Visualização durante a Modelagem;
- ?? Visualização durante a Simulação

6.1 VISUALIZAÇÃO NA ETAPA DE MODELAGEM

Na etapa de modelagem do manipulador mecânico não há informação sobre a estrutura hierárquica do manipulador. Nesta etapa, as peças permanecem livres, sem qualquer ligação física entre elas.

Nesta etapa, a visualização corresponde aos passos necessários para mapear a informação geométrica 3D que está armazenada na estrutura de dados do Sistema ASIMOV em um monitor matricial, onde se formam as imagens do manipulador mecânico. A figura 5 apresenta o pipeline de visualização na etapa de modelagem, isto é, a seqüência de passos que devem ser executados para a visualização do manipulador na tela.

O pipeline de visualização deve ser aplicada em cada janela de exibição da tela. Além disso, qualquer alteração em uma das vistas do manipulador exige que o pipeline de visualização seja novamente aplicada a cada uma das vistas do manipulador, de forma a se manter a consistência entre as janelas de exibição.

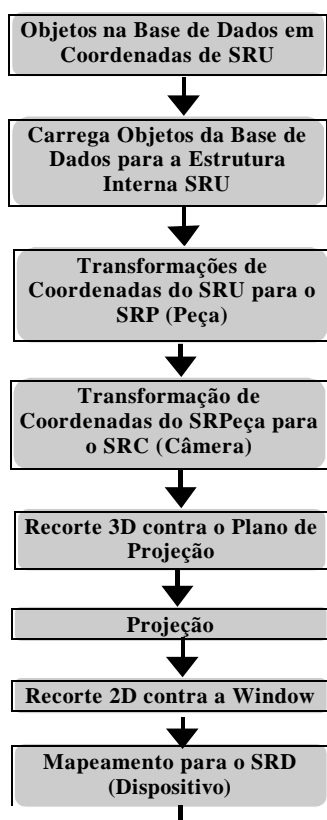


Figura 5 – Pipeline de Visualização 3D durante a Modelagem. Nesta figura, SRU é o sistema de coordenadas do universo; SRP é o sistema de coordenadas de peça, SRC é o sistema de coordenadas da câmera sintética, SRD é o sistema de coordenadas de tela e window é a janela de seleção no SRU.

6.2 VISUALIZAÇÃO NA ETAPA DE SIMULAÇÃO

O módulo de visualização permite ao usuário selecionar um manipulador da base de dados e simular seu funcionamento. Portanto, é necessária uma estrutura de dados representando a hierarquia de manipuladores. Assim, o processo de visualização na etapa de simulação é diferente do processo na etapa de modelagem.

Estas diferenças estão situadas na inclusão de alguns passos novos e na divisão do processo de visualização em dois blocos na etapa de simulação. Estes blocos são:

- ☞ Passos executados antes do início da simulação
- ☞ Passos executados em cada quadro da simulação

Os passos executados antes do início da simulação geram as estruturas para representar a hierarquia de peças existente no manipulador.

Os passos executados em cada quadro de simulação analisam esta hierarquia e extraem a informação geométrica necessária. Após, o processo de visualização na etapa de simulação é similar ao processo de visualização na etapa de modelagem.

A Figura 6 apresenta a seqüência de passos na visualização na etapa de simulação.

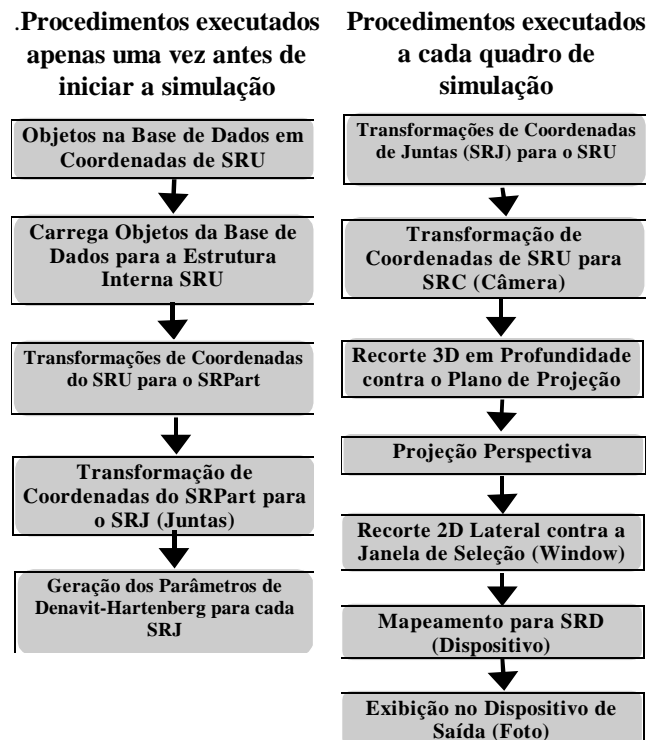


Figura 6 – Pipeline de Visualização 3D durante a Simulação [8]. Nesta figura, SRU é o sistema de coordenadas do universo; SRPart é o sistema de coordenadas de peça, SRJ é o sistema de coordenadas de junta; SRC é o sistema de coordenadas da câmera sintética, SRD é o sistema de coordenadas de tela e window é a janela de seleção no SRU.

O último passo da pipeline descrita na figura 6, que exibe a imagem no dispositivo de saída, faz uso de uma técnica simples mas que traz um excelente resultado para o realismo da simulação, a técnica *swap buffer*. Com essa técnica, ao invés de seguir o procedimento normal de calcular os pontos para a exibição da imagem e então desenhar a imagem diretamente na tela, os pontos são calculados e a imagem é gravada em um buffer. A partir disso, a imagem pronta que está armazenada no buffer é copiada de uma vez só para o vídeo, sobrepondo a imagem do quadro anterior da simulação, sem apaga-la anteriormente. Isso é feito sucessivamente na exibição de cada quadro. Com isso, as “piscadas” da tela entre a exibição de dois quadros consecutivos de animação são evitadas e obtém-se uma simulação satisfatoriamente próxima do movimento real.

7. MÓDULO DE SIMULAÇÃO

As ações do manipulador são determinadas por um programa. A simulação de um programa inicia por sua definição. O sistema ASIMOV apresenta um editor de programas orientado a sintaxe integrado ao ambiente. A linguagem utilizada no Sistema ASIMOV para a programação de manipuladores é a VAL II [7].

Após a edição do programa, o mesmo é submetido a um processo de análise para verificar sua correção e uma estrutura mais apropriada à simulação é gerada. Da estrutura gerada pelo processo de análise, um conjunto de pontos alvo e as respectivas coordenadas cartesianas são gerados. Após, a conversão destes pontos para coordenadas de juntas é feita através de algoritmos de cinemática inversa. A cinemática inversa usa transformações homogêneas para gerar um sistema de equações no qual o resultado é uma função das coordenadas cartesianas do ponto alvo e das outras posições das juntas [5]. Para obter a solução destas equações um algoritmo iterativo é necessário. Entretanto, considerando-se que a programação de tarefas para robôs relativamente simples gera uma quantidade muito grande de pontos, o uso destes algoritmos demanda um grande esforço computacional. Em face desta dificuldade, soluções fechadas foram desenvolvidas para a maioria dos manipuladores mecânicos disponíveis.

A figura 7 mostra o ASIMOV durante a simulação de um programa. Pode-se ver na figura o painel do *teach pendant*, o painel dos sensores e o manipulador sendo simulado.

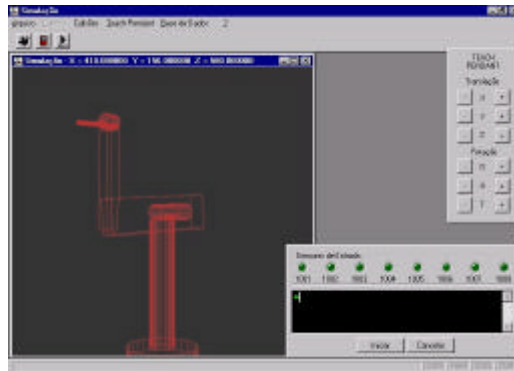


Figura 7 – Tela do Módulo de Simulação do Sistema ASIMOV.

8. RENDERING

Alguns elementos que não faziam parte do projeto ASIMOV original foram acrescentados devido a necessidades identificadas durante a validação do sistema. Estes componentes são as implementações de métodos de *rendering* e detecção de colisões. O processo de validação foi efetuada por especialistas em Engenharia Elétrica e Mecânica. Os componentes *rendering* e detecção de colisões foram implementados como trabalhos de conclusão de curso por alunos de graduação do Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade de Caxias do Sul.

Os métodos de *rendering* aumentam o realismo da imagem gerada pelo computador. Os métodos de *rendering* implementados no ASIMOV são a remoção de elementos ocultos e o cálculo de iluminação e sombreado.

Entre os vários métodos de *rendering* encontrados na literatura, o método selecionado foi o sombreado de Gouraud [4], aplicado a um modelo de iluminação local. O sombreado de Gouraud interpola a intensidade na superfície. Em um modelo de iluminação local, apenas a primeira reflexão de luz é considerada. O sombreado de Gouraud calcula as intensidades de iluminação para cada vértice dos polígonos que formam os objetos primitivos e usa uma interpolação entre os vértices para calcular a iluminação em outros pontos. O sombreado de Gouraud elimina o efeito de intensidades descontínuas e dá um aspecto de suavidade aos objetos curvos representados como uma malha de polígonos. Este método não é o mais realístico, entretanto, sua implementação é simples e sua execução é mais rápida que outros métodos de realismo. No caso do projeto ASIMOV, o principal objetivo é a simulação de movimento. Assim, o sombreado de Gouraud é adequado, dado que:

- ?? É o método mais rápido para geração de imagens;
- ?? é adequado à estrutura de dados usada para representar os manipuladores mecânicos no sistema ASIMOV;
- ?? fornece o grau de realismo necessário para que o projeto ASIMOV atinja seus objetivos.

9. DETECÇÃO DE COLISÕES

A validação do sistema ASIMOV também demonstrou a necessidade de se incluir a funcionalidade detecção de colisões ao projeto ASIMOV original. Em um ambiente de operação real, um manipulador mecânico pode atingir outros objetos. Assim, é importante durante a simulação de um manipulador mecânico verificar se ocorreram colisões.

Esta verificação pode ser feita através do uso de projeções perspectivas, obtidas de diferentes posições do visualizador no ambiente durante a simulação, com o uso de uma câmara sintética. Entretanto, esta alternativa envolve busca exaustiva e erros podem ocorrer. Para evitar isso, um procedimento automático de detecção de colisões é utilizado. Este procedimento verifica se um objeto ocupa o espaço já ocupado por outro objeto. Este teste é feito a partir da descrição geométrica dos objetos e de sua posição e orientação no universo.

Após um estudo dos algoritmos existentes na literatura sobre detecção de colisões, concluiu-se que um algoritmo em quatro passos, apresentado por Garcia-Alonso [6], tinha grandes vantagens sobre os demais. Duas razões principais justificam a escolha do método para o projeto ASIMOV:

- ?? a adequação à representação das estruturas geométricas;
- ?? eficiência (o método deve assegurar que uma simulação em tempo-real é possível).

Este método executa uma seqüência de quatro passos onde cada passo é um filtro de possibilidades de colisão. O último passo raramente será executado, apenas quando alguma possibilidade de colisão não for detectada pelos passos anteriores. Além disso, um conjunto de procedimentos é executado na etapa de pré-processamento. Esta etapa de pré-processamento reduz a quantidade de processamento necessário durante o laço de simulação. O envelope minimax e a

voxelização são dois métodos utilizados pelo algoritmo de Garcia-Alonso com o objetivo de otimizar o processo de detecção de colisões de modo que o mesmo possa ser executado em um computador pessoal.

10. IMPLEMENTAÇÃO

O sistema ASIMOV foi desenvolvido utilizando a linguagem C++. O ASIMOV executa nos sistemas operacionais Windows 95 e Windows NT. O compilador utilizado foi o Borland C++ 5.01 da Inprise Inc. As rotinas da base de dados de componentes também foram desenvolvidas em C++ utilizando o SGBD Oracle.

11. CONCLUSÕES

Normalmente, para avaliar o comportamento de um manipulador mecânico, é necessário construir um protótipo físico para verificar se ele atende os objetivos de projeto. Para a construção deste protótipo, uma grande quantidade de tempo é necessária. Se há alterações no projeto inicial, novos protótipos devem ser construídos. Por outro lado, com um protótipo nem sempre é possível obter todas as informações necessárias para analisar o projeto. Um ambiente para representar e manipular objetos físicos é importante porque ele elimina, ou ao menos reduz, a necessidade de construir protótipos físicos. Em um sistema com suporte ao desenvolvimento de protótipos virtuais, os usuários podem analisar e avaliar seu projeto em diferentes situações, utilizando menos tempo, esforço e recursos.

O projeto ASIMOV foi desenvolvido neste contexto. O sistema ASIMOV é um ambiente integrado para auxiliar no projeto e simulação de manipuladores mecânicos e no ensino dos fundamentos da robótica. Pode ser utilizado tanto nos níveis técnico e acadêmico, ou mesmo em um ambiente industrial como um complemento para o profissional que desenvolve ou opera este tipo de equipamento.

Atualmente, o ASIMOV está sendo utilizado nos cursos de Automação Industrial e Engenharia Mecânica, na Universidade de Caxias do Sul.

12. TRABALHOS FUTUROS

Nas próximas versões do sistema ASIMOV pretende-se:

- ?? Possibilitar a inclusão de juntas prismáticas nos manipuladores mecânicos;
- ?? considerar a dinâmica na simulação dos manipuladores mecânicos;
- ?? simular manipuladores mecânicos não seriais;
- ?? incluir métodos para simulação de manipuladores genéricos (atualmente estão implementadas somente soluções fechadas);
- ?? incluir tutores para pneumática e eletricidade;
- ?? otimizar os algoritmos utilizados (melhorar desempenho);
- ?? otimizar as estruturas de dados do sistema, de forma a reduzir a quantidade de memória necessária.

Também estão sendo feitos esforços para integrar o ASIMOV em um ambiente de simulação global de uma linha de produção.

13. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UCS, CNPq e FAPERGS pelo suporte financeiro ao desenvolvimento do projeto ASIMOV. Também gostaríamos de agradecer aos bolsistas e professores da Universidade de Caxias do Sul que trabalharam no projeto ASIMOV.

14. BIBLIOGRAFIA

- [1] BUTIGNOL, C. M. Táticas de Ensino para um Sistema Tutorial Inteligente em Hidráulica. Caxias do Sul: UCS, 1995. (Trabalho de Conclusão de Curso)
- [2] DENAVIT, J.; HARTENBERG, R. S. A Kinematics Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *J. App. Mech.*, v.77, p.215-221. 1955.
- [3] FACHIN, N. Obtenção de Imagens de Objetos Geométricos Modelados por Computador Através de Técnicas de Cálculo de Iluminação e Métodos de Sombreamento, 1997. (Trabalho de Conclusão de Curso)
- [4] FOLEY, J. D. *et all.* Computer Graphics: principles and practice. Massachusetts: Addison-Wesley, 1990.
- [5] FU, K. S. *et all.* Robotics: Control, sensing, vision and intelligence. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [6] GARCIA-ALONSO, A. *et all.* Solving the Collision Detection Problem. In: IEEE Computer Graphics and Applications, v.14, n.4, p. 36-43, 1994.
- [7] GROOVER, M. P. *et all.* Industrial Robotics. New York: McGraw-Hill, 1986.

- [8] MACIEL, A. Relatório Técnico do Módulo de Programação do Projeto ASIMOV para o PIBIC/CNPq. Caxias do Sul: UCS, 1998. (Relatório Técnico)
- [9] MACIEL, A. Detecção de Colisões entre Pares de Poliedros Rígidos Aplicada ao Projeto ASIMOV, 1998. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- [10] PAUL, R. P.; SHIMANO, B.; MAYER, G. E. Kinematic Control for Simple Manipulators. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v.11, n.6, p. 449-455, 1981.
- [11] PELLIN, A. F.; ORTIGARA, V. Interface Cliente/Servidor para os Módulos de CAD de Base de Dados de Componentes do Projeto ASIMOV. Caxias do Sul: UCS, 1997. (Trabalho de Conclusão de Curso)
- [12] SOUZA, A. *et all.* Educational Framework for the Development of Mechanical Manipulators. In: INTERNATIONAL IFIP 9.9 CONFERENCE, 1997, Florianópolis. **Proceedings...**, Florianópolis: [S. N.], 1997
- [13] VIECELLI, G. Estratégias de Ensino para um Tutor Inteligente em Hidráulica. Caxias do Sul: UCS, 1994. (Trabalho de Conclusão de Curso)
- [14] WEBBER, C. G. Representação do Conhecimento sobre o Domínio em um Sistema Tutorial Inteligente de Hidráulica. . Caxias do Sul: UCS, 1994. (Trabalho de Conclusão de Curso)