

### 3

## Módulo Cinegrafista Proposto

O módulo proposto neste trabalho parte do conceito apresentado por Druker [16] sobre o uso de restrições que, agrupadas, conseguem produzir o posicionamento e movimento de câmera esperado. Assim como Halper et al. [23], assumimos que a aplicação terá uma alta taxa de quadros por segundo e que a solução para o sistema não precisa ser ótima e sim satisfatória. Propomos um modelo físico capaz de expressar os parâmetros de uma câmera “pinhole” e, com base no artigo de Jakobsen [32], utilizamos o método de integração Verlet [42] para evoluir o modelo ao longo do tempo. As restrições impostas ao sistema são satisfeitas através da técnica de relaxação [38]. As restrições contêm valores de prioridade associados que permitem atribuir graus de importância para a satisfação de cada restrição, tornando o sistema mais flexível. São utilizados valores de referência para que o módulo consiga avaliar o quanto cada restrição está sendo satisfeita. Essa informação é transmitida para o módulo superior que, ao analisá-la, tem a opção de alterar as configurações das restrições.

O funcionamento do módulo cinegrafista se dá através dos seguintes passos (Figura 3.1):

1. O modelo físico de câmera evolui o sistema através do método de integração numérica Verlet, aplicando as forças externas, se existentes.
2. O módulo utiliza a técnica de relaxação para satisfazer as restrições impostas pelo módulo superior (diretor/editor).
3. O módulo analisa o quanto as restrições foram satisfeitas e disponibiliza a informação para o módulo superior.
4. O modelo físico é traduzido para os parâmetros de uma câmera virtual, definindo os novos valores da câmera corrente.

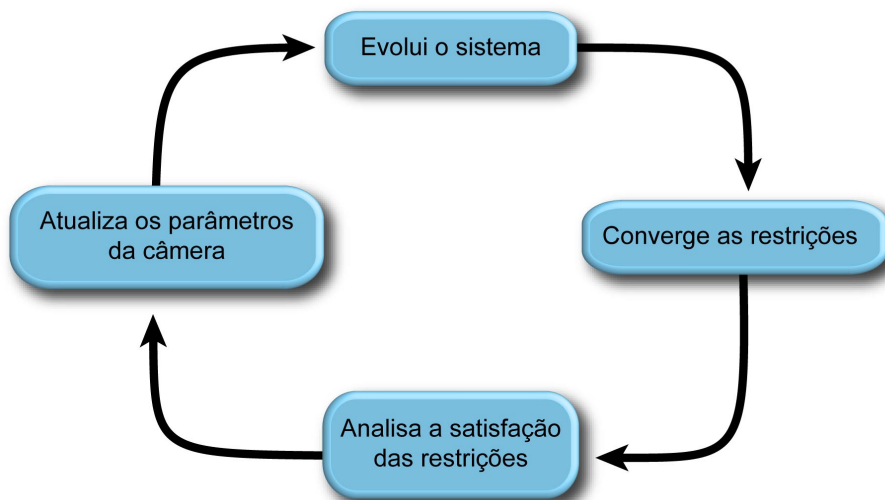


Figura 3.1: Funcionamento do módulo cinegrafista

### 3.1

#### Modelo Físico

Neste estudo, a câmera baseada no modelo “pinhole” é descrita por meio de um modelo físico e passa a ser tratada como um corpo que pode ser submetido a forças externas e restrições. O uso de um modelo físico para descrever a câmera não significa simular o comportamento de uma câmera real, mas se valer dos princípios da física para ajudar na resolução do sistema. O uso do ambiente físico para a definição dos parâmetros da câmera torna o sistema mais versátil, por permitir a adição de forças externas que alterem o comportamento da câmera. Por exemplo, forças gravitacionais podem ser diretamente aplicadas à câmera quando esta é descrita por um modelo físico.

Uma câmera virtual possui sete parâmetros de configuração: *posição*, *direção*, *up*, *fovy*, *aspect*, *znear* e *zfar*. O modelo de câmera proposto neste trabalho é composto por cinco partículas conectadas por barras rígidas. Ele relaciona cinco dos parâmetros da câmera, excetuando-se os parâmetros *znear* e *zfar*. Um valor de distância *dist* é passado ao modelo como a distância da partícula  $p_0$  ao centro do plano formado pelas partículas  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  e  $p_4$ . A Figura 3.2 ilustra o modelo físico proposto.

A tradução do posicionamento das partículas para os parâmetros de uma câmera virtual se dá de acordo com as equações abaixo:

$$p\vec{o}s = p\vec{0} \quad (3-1)$$

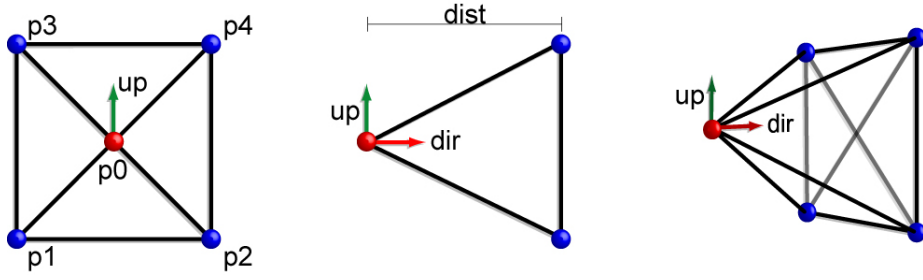


Figura 3.2: Visão frontal, lateral e sob perspectiva do modelo de câmera.

$$\vec{up} = \left( \frac{\vec{p4} + \vec{p3}}{2} \right) - \left( \frac{\vec{p2} + \vec{p1}}{2} \right)$$

$$\widehat{up} = \frac{\vec{up}}{\|\vec{up}\|} \quad (3-2)$$

$$\vec{dx} = \left( \frac{\vec{p2} + \vec{p4}}{2} \right) - \left( \frac{\vec{p1} + \vec{p3}}{2} \right)$$

$$\widehat{dx} = \frac{\vec{dx}}{\|\vec{dx}\|}$$

$$\widehat{dir} = \widehat{up} \times \widehat{dx} \quad (3-3)$$

$$\vec{center} = \frac{\vec{p1} + \vec{p2} + \vec{p3} + \vec{p4}}{4}$$

$$fovy = \arctan\left(\frac{\|\vec{dx}\|}{2 \cdot z_{near}}\right) \quad (3-4)$$

$$aspect = \frac{\|\vec{dx}\|}{\|\vec{up}\|} \quad (3-5)$$

A tradução dos parâmetros de uma câmera virtual para o modelo proposto se dá de acordo com as equações abaixo:

$$\vec{p0} = \vec{pos} \quad (3-6)$$

$$\vec{center} = \vec{p0} + \widehat{dir} \cdot dist$$

$$\vec{dx} = (\widehat{dir} \times \widehat{up}) \cdot (\|\vec{center}\| \cdot \tan(\frac{fovy}{2}))$$

$$\vec{dy} = \widehat{up} \cdot \frac{\|\vec{dx}\|}{aspect}$$

$$p1 = center - \vec{dx} - \vec{dy} \quad (3-7)$$

$$p2 = center + \vec{dx} - \vec{dy} \quad (3-8)$$

$$p3 = center - \vec{dx} + \vec{dy} \quad (3-9)$$

$$p4 = center + \vec{dx} + \vec{dy} \quad (3-10)$$

### 3.2

#### Método de Integração Verlet

O núcleo de toda simulação física de partículas corresponde a calcular as forças atuantes e utilizar um método numérico para definir o estado das partículas no próximo passo, satisfazendo as restrições impostas. Desta forma, cada partícula precisa armazenar em sua estrutura sua posição e velocidade atuais. O método de integração numérica Verlet [42] torna a velocidade um parâmetro implícito, armazenando na estrutura a posição atual e a posição anterior. Com a velocidade implícita, se torna mais fácil a utilização de restrições que alteram o posicionamento de partículas, pois a restrição não precisa calcular a nova velocidade da partícula. O cálculo para as posições subseqüentes da partícula se dá de acordo com a equação abaixo:

$$x_{t+1} = 2 \cdot x_t - x_{t-1} + a \cdot (\Delta t)^2 \quad (3-11)$$

onde  $x_t$  representa a posição corrente,  $x_{t-1}$  a posição no passo anterior,  $a$  representa a aceleração e  $\Delta t$  o passo de tempo.

A velocidade é encontrada através da equação:

$$v_t = \frac{x_t - x_{t-1}}{\Delta t} \quad (3-12)$$

O método Verlet é rápido e estável. Por colocar a velocidade de forma implícita no cálculo, torna-se difícil que a posição e a velocidade da partícula fiquem fora de sincronia. Por outro lado, o método peca quanto a sua precisão, mas ao considerarmos que procuramos uma solução satisfatória

e que a aplicação terá uma alta taxa de quadros por segundos, a falta de precisão do método se torna irrelevante para a simulação física.

É possível ainda adicionar um coeficiente de amortecimento na evolução do sistema. A equação do método numérico Verlet que faz uso do coeficiente de amortecimento pode ser verificada na equação 3-13, onde  $damping = 0$  corresponde a um amortecimento total do sistema e  $damping = 1$  corresponde à falta de amortecimento.

$$x_{t+1} = x_t + damping \cdot (x_t - x_{t-1}) + a \cdot (\Delta t)^2 \quad (3-13)$$

### 3.3

#### Convergência do sistema

Com um modelo físico de câmera baseado no posicionamento de cinco partículas no qual múltiplas restrições atuam sobre o modelo, é preciso definir um método matemático capaz de encontrar a cada quadro um posicionamento correto das partículas do modelo de câmera, de forma que esse posicionamento atenda a todas as restrições impostas. Deve-se considerar que o método matemático pode se valer das vantagens de não precisar encontrar a solução ótima, mas apenas uma solução satisfatória para o problema. Pode-se ainda considerar que haverá uma coerência no posicionamento das partículas em quadros consecutivos. Entretanto, como a aplicação possui uma alta taxa de quadros por segundo, o método deve ser rápido o suficiente para conseguir produzir uma resposta a cada quadro. Além disso, caso o sistema não encontre uma solução que atenda a todas as restrições, o método matemático deve fornecer uma solução aproximada para o sistema.

A técnica de relaxação [38] consegue tirar vantagem da coerência entre os quadros e é rápida o suficiente para se chegar a uma solução satisfatória do problema, independente do sistema apresentar ou não alguma solução válida. O funcionamento da técnica de relaxação consiste em que a partir de um estado inicial do modelo, as restrições passem a atuar uma por vez, durante várias iterações. Com a repetição da aplicação das restrições, o sistema tende a convergir para um estado satisfatório. Uma vantagem desta técnica é o fato do sistema já possuir uma solução logo na primeira iteração, e que esta solução tende a melhorar à medida que mais iterações são feitas sobre o modelo.

A Figura 3.3 apresenta um exemplo da aplicação da técnica de relaxação em um sistema formado por três partículas e duas barras rígidas,

em que no estado inicial as barras têm um comprimento maior que o permitido e, com a aplicação das restrições, o sistema converge para um estado válido.

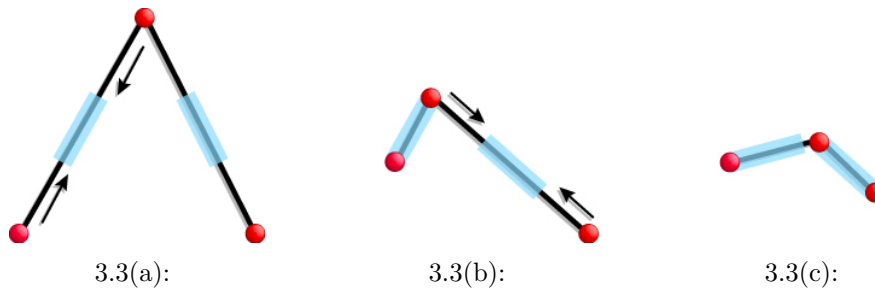


Figura 3.3: Técnica de relaxação aplicada sobre 3 partículas e 2 barras rígidas: (a) estado inicial com o comprimento das duas barras maior que o permitido; (b) resultado após a aplicação da restrição da primeira barra rígida; (c) resultado com a aplicação da restrição da segunda barra rígida. Após a primeira iteração o sistema já apresenta um estado mais satisfatório do que o estado inicial e o aumento do número de iterações tende a fazer o sistema convergir o sistema para soluções ainda melhores.

### 3.4 Restrições

O conceito de se utilizar restrições que definem características quanto ao posicionamento e velocidade da câmera foi definido por Druker [16]. Druker ainda listou um grande número de restrições que permitem qualquer tipo de configuração de câmera. Hawkins [26] definiu uma série de configurações de câmera para um uso correto da cinematografia nos jogos, como posicionamento, velocidades de translação e orientação, enquadramento e respeito à linha de ação. Este trabalho define um subgrupo das restrições listadas por Druker que tornem possíveis as configurações cinematográficas definidas por Hawkins.

As restrições desenvolvidas procuram sempre ajustar o sistema da maneira mais simples que o satisfaça, atuando independente da existência de outras restrições. Isso significa que uma restrição altera o modelo da câmera sem se preocupar com a qualidade de todo o sistema, mas buscando apenas em satisfazer a si própria. O uso de restrições que atuem de forma simples e independente se traduz num sistema eficiente e flexível, pois novas restrições podem ser adicionadas livremente ao sistema.

A seguir é apresentada cada uma das restrições desenvolvidas, explicando suas responsabilidades quanto à configuração da câmera e como a restrição é atendida.

### 3.4.1 Barra Rígida

A restrição de barra rígida define uma distância mínima e máxima entre duas partículas. O modelo físico da câmera utiliza esta restrição para definir os espaçamentos entre as partículas.

A barra rígida é formada por duas partículas, cada uma possuindo uma massa. Se as partículas estiverem fora da distância exigida, elas são aproximadas ou afastadas proporcionalmente à sua massa a fim de atender a restrição. A Figura 3.4 ilustra o procedimento de atendimento à restrição de uma barra formada por duas partículas de massas iguais.

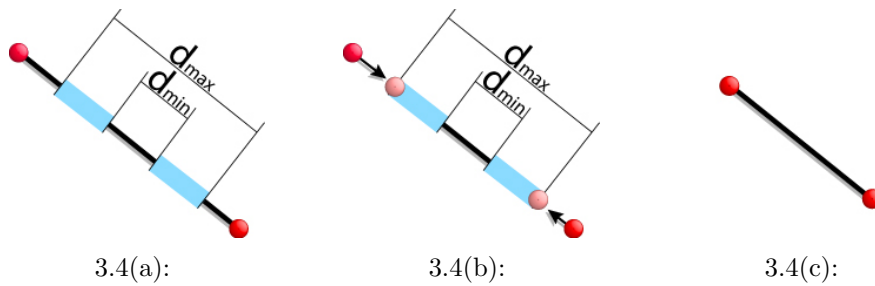


Figura 3.4: Restrição de barra rígida: (a) barra não atendendo à restrição; (b) transformação do estado inválido da barra para o estado válido; (c) restrição satisfeita

### 3.4.2 Posicionamento em um volume

A restrição de posicionamento em um volume fixa uma partícula dentro de um volume. Quando aplicada à partícula  $p0$  do modelo de câmera, força a câmera a atuar sempre posicionada dentro de um volume, área ou ponto específico do ambiente.

O funcionamento da restrição verifica se a partícula  $p0$  do modelo de câmera está dentro do volume especificado e, se não estiver, a partícula é arrastada para a borda mais próxima do volume. A Figura 3.5 ilustra o modelo de câmera atendendo à restrição. Note que o posicionamento das demais partículas é inalterado, devido à independência no tratamento das restrições. As restrições de barra rígida contidas no modelo de câmera se responsabilizam por tornar válido o estado do modelo.

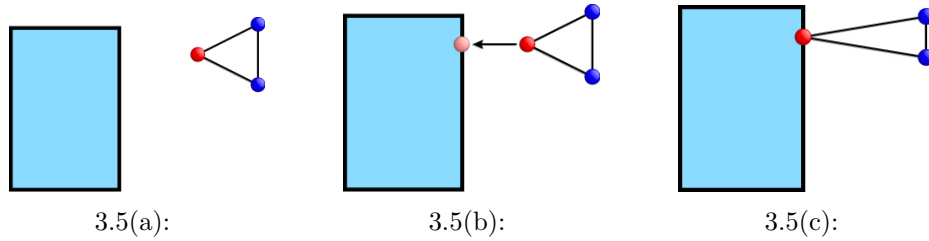


Figura 3.5: Restrição de posicionamento em volume: (a) câmera não atendendo à restrição; (b) transformação do estado inválido para o estado válido; (c) câmera com a restrição satisfeita.

### 3.4.3

#### Posicionamento em segmento de reta

A restrição de posicionamento em segmento de reta força a câmera a se posicionar sempre sobre um segmento de reta, possibilitando criar uma câmera que atue sobre trilhos.

A restrição verifica se a partícula  $p_0$  está sobre o segmento de reta; se não estiver a partícula é arrastada para o ponto da reta mais próximo. A Figura 3.6 ilustra a aplicação da restrição ao modelo de câmera.

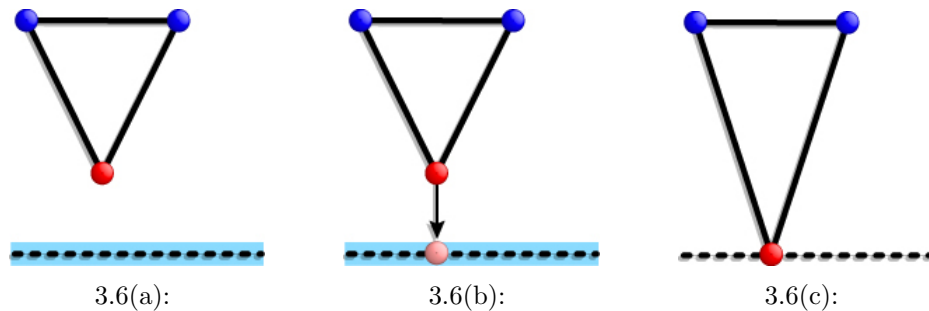


Figura 3.6: Restrição de posicionamento em segmento de reta: (a) modelo de câmera não atendendo à restrição; (b) transformação do estado inválido para o estado válido; (c) câmera com a restrição satisfeita.

### 3.4.4

#### Orientação

A restrição de orientação define valores máximos de rotação para cada eixo do modelo de câmera, tornando possível fixar determinados eixos de rotação a fim de evitar que a câmera assuma orientações indesejáveis.

A restrição recebe eixos de referência identificando a orientação que possui ângulo de rotação zero nos três eixos. A partir dos eixos de referência é possível calcular o ângulo de rotação em relação a cada eixo, e caso o ângulo seja maior que o permitido a câmera é rotacionada até a orientação válida,



através da translação das partículas  $p1$ ,  $p2$ ,  $p3$ ,  $p4$ . A Figura 3.7 demonstra a restrição em um dos eixos sendo atendida.

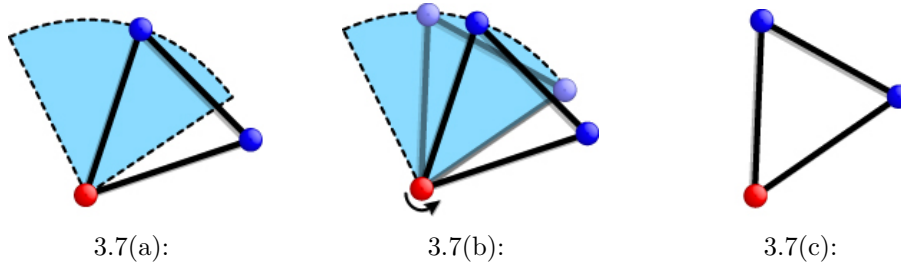


Figura 3.7: Restrição de orientação: (a) câmera que não atende à restrição de orientação; (b) rotacionando o necessário para tornar a câmera satisfeita pela restrição; (c) câmera satisfazendo a restrição.

### 3.4.5

#### Fov

A restrição de fov define limites mínimos e máximos para o  $fov_x$  e  $fov_y$  do modelo de câmera, permitindo definir qual a abertura angular válida para a câmera.

$fov_x$  e  $fov_y$ , de modo diferente dos outros graus de liberdade, são implícitos ao modelo físico da câmera. Assim, a restrição corrige os comprimentos das barras rígidas do modelo físico caso eles não estejam satisfazendo a restrição. A Figura 3.8 ilustra a aplicação da restrição.

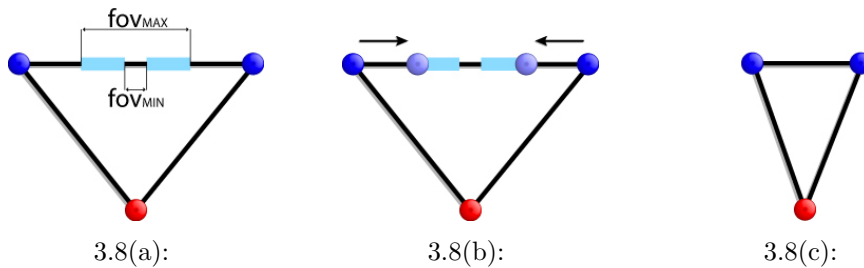


Figura 3.8: Restrição de fov: (a) câmera que não atende à restrição; (b) transformação de estado inválido para o estado válido; (c) câmera com a restrição de fov satisfeita.

### 3.4.6

#### Velocidade de translação

A restrição de velocidade de translação define limites mínimos e máximos de velocidade de translação do modelo de câmera, permitindo por exemplo evitar saltos muito grandes de posição entre um frame e outro.

A restrição analisa a velocidade da partícula  $p0$  do modelo de câmera, determinando se a posição atual é válida; caso contrário, a partícula  $p0$  é arrastada para a posição válida mais próxima. A Figura 3.9 ilustra a aplicação da restrição.

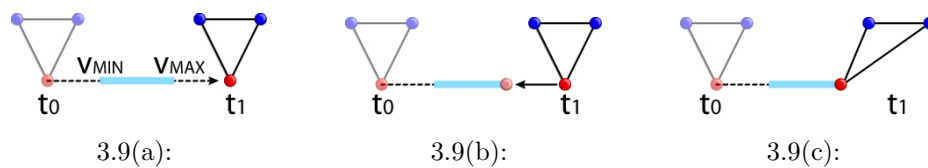


Figura 3.9: Restrição de velocidade de translação: (a) estado anterior, atual e a velocidade da partícula  $p0$ ; (b) translação aplicada à partícula  $p0$  para tornar o estado válido; (c) câmera com a restrição satisfeita.

### 3.4.7

#### Velocidade de rotação

A restrição de velocidade de rotação define limites mínimos e máximos de velocidade de rotação em cada um dos três eixos de rotação da câmera, tornando possível evitar rotações muito bruscas que desorientariam o espectador.

A restrição através da configuração anterior do modelo de câmera e do intervalo de tempo analisa o ângulo de rotação possível para cada um dos três eixos. Então, é feita uma rotação sobre os eixos que não estiverem satisfazendo a restrição através da translação das partículas  $p1$ ,  $p2$ ,  $p3$ ,  $p4$ . A Figura 3.10 demonstra a aplicação da restrição sobre um dos eixos de rotação do modelo de câmera.

### 3.4.8

#### Velocidade do fov

A restrição de velocidade do fov define limites mínimos e máximos para a velocidade do  $fov_x$  e  $fov_y$ . Através dessa restrição é possível exigir que a câmera altere seu fov ao longo do tempo, deformando a imagem apresentada.

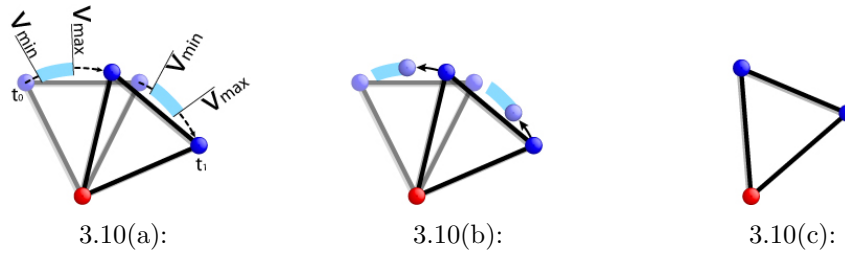


Figura 3.10: Restrição de velocidade de rotação: (a) estado anterior, atual e áreas permitidas de posicionamento das partículas a partir das restrições de velocidade de orientação; (b) rotação necessária para atender à restrição; (c) modelo de câmera com a restrição atendida.

Como os parâmetros  $fov_x$  e  $fov_y$  são implícitos ao modelo de câmera, a restrição verifica o estado anterior das barras rígidas do modelo e altera seus comprimentos de modo a atender à restrição de velocidade do fov. A Figura 3.11 ilustra o atendimento à restrição do modelo de câmera.

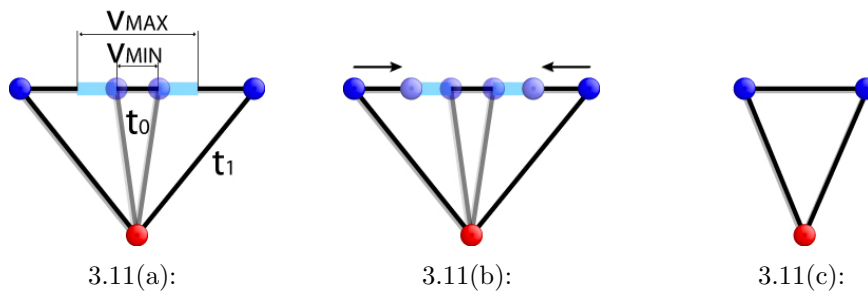


Figura 3.11: Restrição de velocidade do fov: (a) estado anterior, estado atual e o comprimento permitido para a barra rígida atender à restrição; (b) variação do comprimento da barra rígida necessária para atender à restrição; (c) câmera com a restrição atendida.

### 3.4.9 Enquadramento

A restrição de enquadramento posiciona um objeto em uma área específica da tela; desta forma é possível forçar o aparecimento do objeto em cena.

O objeto é definido por um ponto de referência que indica sua posição. A restrição verifica se o ponto está na área permitida e, caso contrário, o modelo de câmera é rotacionado para satisfazer a restrição. A Figura 3.12 exibe a aplicação da restrição.

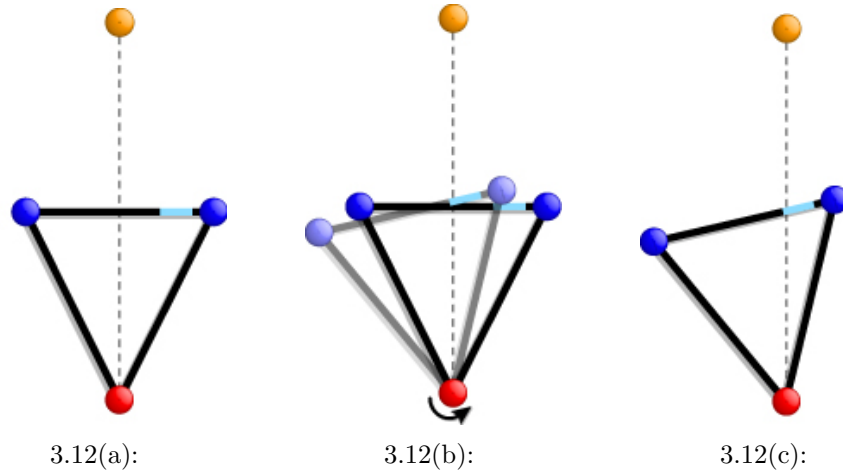


Figura 3.12: Restrição de enquadramento: (a) câmera que não atende à restrição; (b) rotação necessária para transformar o estado inválido da câmera em um estado válido; (c) câmera com a restrição satisfeita.

### 3.4.10

#### Enquadramento sobre outro eixo

A restrição de enquadramento sobre outro eixo posiciona um objeto em uma área específica da tela, mas para atender a restrição a câmera é rotacionada sobre um eixo diferente da posição da partícula  $p_0$ , como mostra a Figura 3.13.

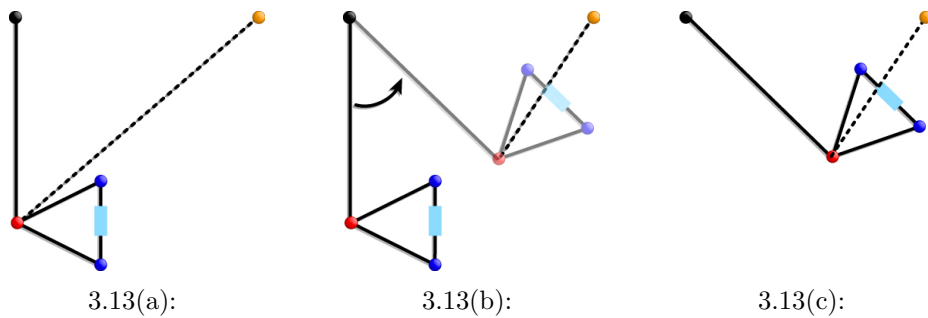


Figura 3.13: Restrição de enquadramento com rotação sobre eixo: (a) câmera que não atende à restrição; (b) rotação necessária sobre um eixo determinado para transformar o estado inválido da câmera em um estado válido; (c) câmera com a restrição satisfeita.

O enquadramento de dois objetos na cena pode ser conseguido aplicando a restrição de enquadramento no primeiro objeto e, utilizando a restrição de enquadramento sobre outro eixo no segundo objeto, definindo o eixo de rotação como a posição do primeiro objeto.

### 3.4.11

#### Distância de um objeto

A restrição de distância de um objeto define uma distância mínima e máxima entre o modelo de câmera e um objeto. Com isto uma câmera pode, por exemplo, seguir um determinado objeto.

A restrição de distância é implementada se utilizando da restrição de barra rígida, ligando a partícula  $p_0$  do modelo (massa 0) com um ponto de referência do objeto (massa 1). Com os valores de massa a restrição de barra rígida altera o posicionamento da partícula  $p_0$  sem mover o objeto. A Figura 3.14 demonstra a aplicação da restrição.

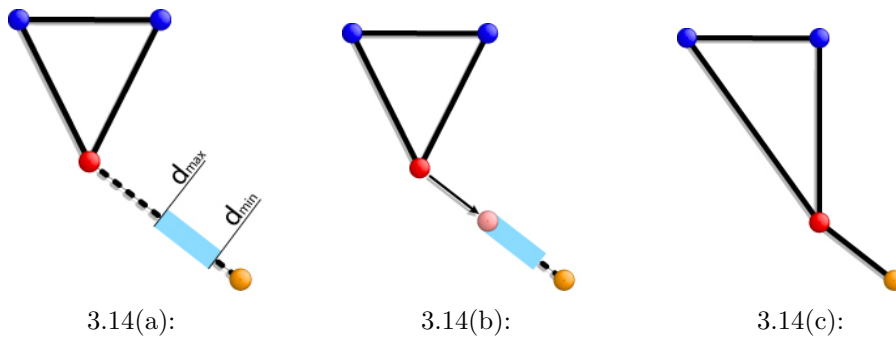


Figura 3.14: Restrição de distância de um objeto: (a) câmera com uma distância que não satisfaz a restrição; (b) translação necessária para atender à restrição; (c) câmera com a restrição satisfeita.

### 3.4.12

#### Tamanho na tela

A restrição de tamanho na tela define limites mínimos e máximos com o qual o objeto deve aparecer na tela. Isso não significa que o objeto garantidamente aparecerá na tela (essa garantia se consegue com a restrição de enquadramento), mas se garante que caso apareça na tela, o objeto estará de um tamanho que atenda à restrição.

Seu funcionamento consiste em adicionar uma barra rígida ligando a partícula  $p_0$  ao centro da esfera envolvente do objeto. As distâncias mínima e máxima permitidas pela barra são calculadas a partir da relação entre o  $z_{near}$ , o tamanho da tela desejado e o raio da esfera envolvente do objeto, onde  $dist = \frac{z_{near} \cdot raio}{tamanho}$ . A Figura 3.15 exemplifica um caso em que a restrição é utilizada.

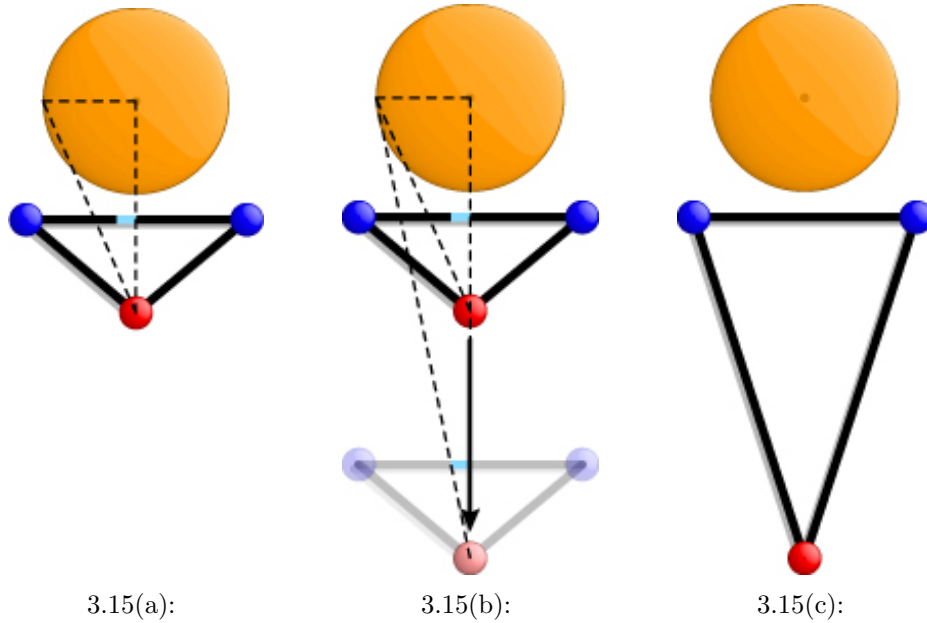


Figura 3.15: Restrição de tamanho na tela: (a) objeto ocupa uma parte maior da tela do que o permitido; (b) o quanto as partículas do modelo físico devem se mover para atender à restrição; (c) câmera com a restrição atendida.

### 3.4.13

#### Direção de um objeto

A restrição de direção de um objeto posiciona a câmera em relação à direção para a qual um objeto está voltado. Dessa forma é possível, por exemplo, colocar a câmera atrás de um objeto.

Através dos valores de angulação mínima e máxima é fixada uma área que a partícula  $p_0$  deve ocupar. Caso ela não se encontre nessa área, toda a câmera é arrastada para a margem mais próxima juntamente com o resto do modelo. Um exemplo dessa restrição é mostrado na Figura 3.16.

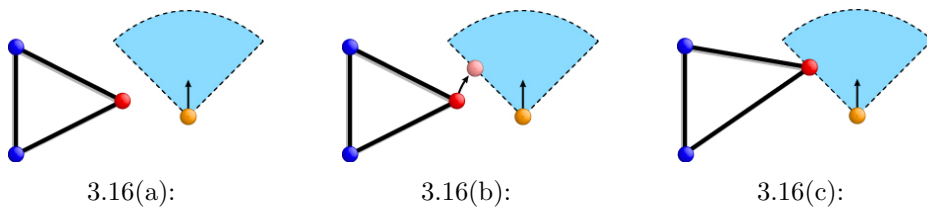


Figura 3.16: Restrição de direção de um objeto: (a) câmera fora da área definida pela restrição; (b) a câmera é arrastada para a margem da área válida; (c) câmera com a restrição atendida.

### 3.4.14

#### Linha de ação

A restrição da linha de ação posiciona a câmera em relação à linha de ação da cena. Dessa forma, é possível evitar que a câmera cruze a linha de ação no decorrer das tomadas.

A restrição da linha de ação divide o ambiente em dois através de um plano, segundo a restrição a câmera só pode atuar em um dos lados do plano. A restrição verifica se a partícula  $p_0$  está no volume válido e, se não estiver, a partícula é arrastada até a posição do plano mais próxima. A Figura 3.17 é exemplifica o funcionamento da restrição.

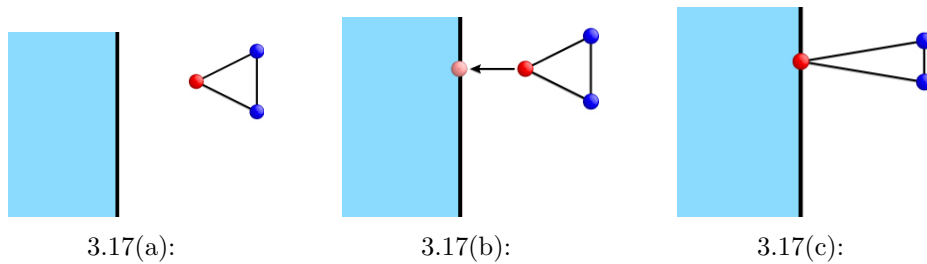


Figura 3.17: Restrição da linha de ação: (a) câmera fora da área definida pela restrição; (b) a partícula  $p_0$  é arrastada para o ponto mais próximo do plano; (c) câmera com a restrição atendida.

### 3.4.15

#### Colisão

A restrição de colisão testa se a câmera está colidindo com o cenário. A câmera possui um volume envolvente definido por uma esfera centrada na posição  $p_0 + \widehat{dir} \cdot z_{near}$ . O diâmetro da esfera é definido a partir dos planos do frustum de visão (*up*, *bottom*, *left*, *right*, *znear* e *zfar*) e é formado pela diagonal do quadrilátero extraído da interseção do plano *znear* com os planos *up*, *bottom*, *left* e *right*. A detecção de colisão define o quanto e em que direção houve a colisão e, a reação à colisão arrasta as partículas do modelo de câmera na direção contrária à direção de colisão. A Figura 3.18 ilustra o atendimento da restrição.

### 3.4.16

#### Visibilidade

A restrição de visibilidade impede que o volume envolvente de um objeto fique encoberto pelo cenário, desviando a câmera quando o cenário impede a visualização do objeto de interesse.

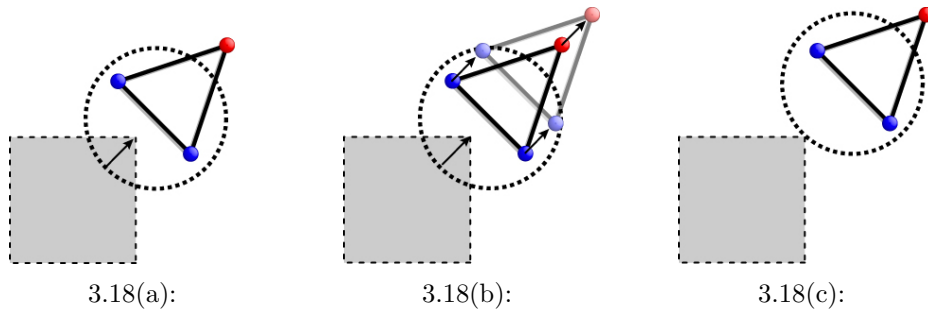


Figura 3.18: Restrição de colisão: (a) esfera envolvente da câmera colidindo e a definição de quanto se deve transladar a esfera para que a colisão seja evitada; (b) movimento do modelo a fim de validar a restrição; (c) câmera com a restrição satisfeita.

Para encontrar uma solução que satisfaça a restrição de visibilidade, são lançados raios em direção à área visualizada do objeto de interesse a partir da posição da partícula  $p_0$  do modelo de câmera. Dois raios são lançados para cada direção: o primeiro contra o objeto de interesse; o segundo contra a cena sem o objeto de interesse. Os raios retornam a distância entre a partícula e o objeto de interesse ou a cena. A partir das duas distâncias, é possível determinar se o ponto do objeto de interesse atingido pelo raio está visível pela câmera.

Um centro geométrico é calculado a partir dos pontos da cena que impedem a visibilidade dos pontos do objeto de interesse. A restrição de visibilidade opta por mover a partícula  $p_0$  do modelo de câmera na menor distância possível para tirar o centro geométrico da área visualizada do objeto de interesse. O movimento da partícula  $p_0$  não torna necessariamente a restrição válida, entretanto a repetição da aplicação da restrição, feita pela técnica de relaxação, dá continuidade ao movimento da partícula  $p_0$ , através da geração de novos centros geométricos. A figura 3.19 demonstra a execução da restrição de visibilidade.



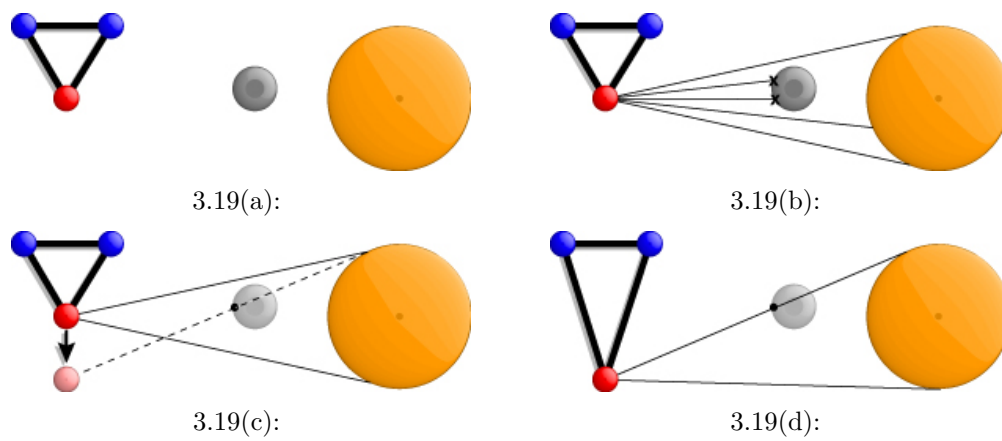


Figura 3.19: Restrição de visibilidade: (a) câmera, cenário e objeto de interesse; (b) raios lançados a partir da partícula  $p_0$  atingindo a cena e o objeto de interesse; (c) centro geométrico e movimento da partícula  $p_0$  a fim de atender à restrição; (d) centro geométrico fora da área de visão, a aplicação de novas iterações tende a satisfazer a restrição.

### 3.5 Prioridade

Quando se deseja criar um comportamento de câmera formado pelo agrupamento de várias restrições, é necessário definir graus de importância entre elas. Certas restrições precisam ser atendidas com maior prioridade do que outras. Por exemplo, as barras rígidas que formam o modelo da câmera devem ter uma prioridade de atendimento maior do que restrições como de enquadramento, uma vez que se não forem satisfeitas, o modelo de câmera se tornará inválido.

No módulo cinegrafista proposto, cada restrição possui um valor relativo à sua prioridade, e seu uso se dá da seguinte forma: uma vez calculado o quanto a restrição deverá alterar o estado do modelo, esse valor é multiplicado pelo valor da prioridade da restrição, que varia de 0 a 1. Dessa forma, restrições de baixa prioridade levam um número maior de iterações para alcançar seu resultado, enquanto restrições com altos valores de prioridade são atendidas em poucas iterações. Valores de prioridade mais baixos também tornam o movimento decorrente da restrição mais suave, enquanto valores mais altos tornam os movimentos mais bruscos. Algumas restrições reagem com movimentos muito violentos, esses movimentos são amortecidos com o uso de valores de prioridade mais baixos. A Figura 3.20 ilustra o uso do valor de prioridade em uma restrição de distância de um objeto com prioridade igual a 0,5.

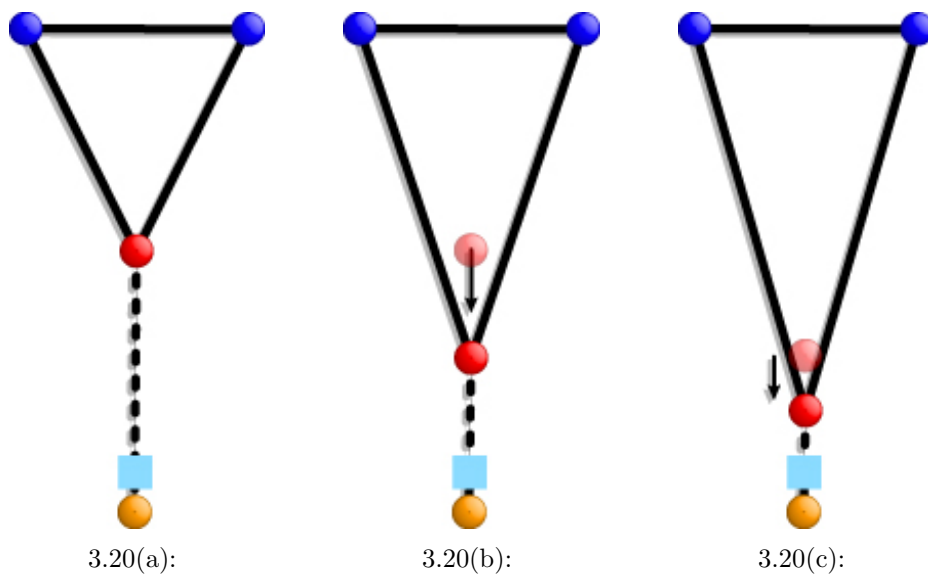


Figura 3.20: Execução de restrição de distância de um objeto com prioridade igual a 0,5: (a) estado antes da atuação da restrição; (b) após a primeira iteração a partícula avança em direção à posição válida; (c) com a segunda iteração a partícula se aproxima ainda mais da posição válida.

Durante a técnica de relaxação a ordem de aplicação das restrições é dependente de seus valores de prioridade, onde restrições com valores menores são atendidos antes de restrições com maior prioridade. Essa ordem força que caso não exista uma solução possível para o sistema, as restrições de maior prioridade foram as últimas a serem aplicadas.

### 3.6

#### Resposta ao atendimento das restrições

O módulo cinegrafista é responsável por posicionar a câmera de uma maneira satisfatória a partir de uma lista de restrições definidas pelo módulo diretor/editor. Como a troca de restrições e de seus parâmetros é efetuada pelo módulo diretor/editor, é importante que o cinegrafista transmita uma resposta quanto ao atendimento das restrições. Dessa forma, o módulo diretor/editor é capaz de avaliar o quanto suas definições de restrições estão sendo atendidas pelo sistema e, assim, resolver se as restrições devem permanecer como estão, se devem ter seus parâmetros alterados ou se necessitam ser substituídas por outro conjunto de restrições.

A princípio o módulo cinegrafista só seria capaz de analisar de modo discreto se a restrição é atendida. Isso significa que, se uma restrição de barra rígida precisa ter comprimento 1,0, ela só seria atendida quando tiver comprimento 1,0. Se a barra possuísse comprimento 0,999 ela já não seria atendida. Como qualquer pequena variação numérica afeta a satisfação da restrição, é necessário criar uma margem de tolerância para o atendimento da restrição, transformando a resposta discreta (0 ou 1) em uma resposta com variação linear (0 a 1). Para isso, cada restrição precisa possuir um valor de referência indicando a partir de onde a restrição não é mais satisfeita. A Figura 3.21 exemplifica a diferença entre uma resposta discreta e uma resposta linear.

Além do valor de resposta de cada restrição, é retornado ao módulo diretor/editor um valor de resposta global, baseado nas respostas de todas as restrições. Esse valor é calculado através de uma média ponderada que se utiliza da prioridade de cada uma das restrições impostas, como mostra a equação 3-14.

$$respostaglobal = \frac{\sum_{i=1}^n prioridade_i \cdot resposta_i}{\sum_{i=1}^n prioridade_i} \quad (3-14)$$

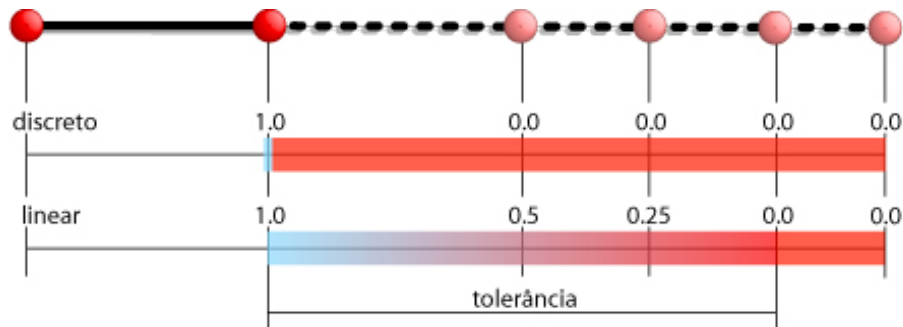


Figura 3.21: Diferença entre respostas discretas e respostas com variação linear para uma restrição de barra rígida com comprimento 1,0 e valor de referência 2,0. Na resposta discreta o valor quanto ao atendimento da restrição é 0 ou 1, enquanto na resposta com variação linear o valor varia de 1 a 0, permanecendo em 0 após a margem de tolerância ser ultrapassada.