

Automatic Calibration of Multiple Markers in an Augmented Reality Environment

Felipe Andrade Caetano, Douglas Coelho Braga de Oliveira,
Rodrigo Luis de Souza da Silva
*Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil*
felipecaetano@ice.ufjf.br, dcoelhobo@gmail.com, rodrigoluis@ice.ufjf.br

Resumo—The purpose of this work is to develop an approach for Augmented Reality systems using multiple markers for redundancy, in order to maintain stability and alignment of the augmentation even when some markers are not fully visible. The proposed approach allows to build such scenario without the calibration of the relations of rotation and distance between the markers, usually adopted in the pre-execution of these systems. The method keeps the relations between the visible markers and a base marker which is responsible for dictating the transformation of the virtual object projected. Methods to choose the base marker, within the visible markers will be proposed.

Keywords-Automatic Calibration; Multimarker Augmented Reality;

Resumo—A proposta deste trabalho é desenvolver uma abordagem para sistemas de Realidade Aumentada usando múltiplos marcadores para redundância, com objetivo de manter a estabilidade e alinhamento da projeção, mesmo quando alguns marcadores não estão completamente visíveis. A abordagem proposta permite construir tal cenários sem a etapa de calibração das relações de rotação e distância entre os marcadores, normalmente adotada na pré-execução destes sistemas. O método mantém as relações entre os marcadores visíveis e um marcador base, responsável por ditar as transformações do objeto virtual projetado. Serão propostos métodos para seleção do marcador base entre os marcadores visíveis disponíveis na cena.

Keywords-Realidade Aumentada; Calibração Automática; Múltiplos Marcadores.

I. INTRODUÇÃO

Na área da Realidade Aumentada (RA) um dos principais problemas de se usar marcadores óticos está no fato de que a oclusão de um marcador, mesmo que de forma parcial, pode fazer com que o sistema deixe de reconhecer com exatidão qual o alinhamento do objeto virtual projetado. Uma técnica comumente usada para contornar este tipo de problema é a combinação de múltiplos marcadores gerando uma única projeção, ou seja, quando um dos marcadores não está mais inteiramente visível, outro marcador é usado como referência para a projeção. O problema deste tipo de técnica é que para obter este efeito, todos os marcadores devem estar estáticos e precisam ter estabelecida sua trans-

formação em relação a uma referência global fixa no espaço conhecido antes da execução [6]. Esta etapa é conhecida como calibração.

Para a calibração, é necessário definir um plano no espaço e calcular, para cada marcador utilizado, qual a translação e rotação em \mathbb{R}^3 que este marcador está em relação à origem do plano definido. Para facilitar a tarefa, é comum adotar um dos marcadores como referência para os demais, eliminando assim a calibração de um marcador na cena, como sugerido em [8]. A calibração usando métodos manuais é bastante efetiva quando se está lidando com um conjunto de marcadores que têm as transformações previamente conhecidas, por exemplo, quando dispostos num mesmo plano ou utilizando uma base que têm seus ângulos conhecidos com precisão. Quando nenhuma dessas situações é encontrada, a calibração pode se tornar extremamente exaustiva por exigir um nível de detalhe que nem sempre é possível de se obter utilizando ferramentas manuais. A situação se agrava mais ainda quando a distância entre os marcadores é grande pois, mesmo o menor dos erros na calibração resulta em objetos virtuais projetados em lugares indesejados.

A obtenção dessas transformações de forma automática, em tempo de execução e sem necessitar da interação do usuário será o foco deste trabalho.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [6] foi proposto um método semelhante ao deste trabalho para utilização de múltiplos marcadores sem a calibração. Na execução, um marcador central serve de referência para todos os outros. O cálculo da relação entre os marcadores se dá de maneira semelhante, porém como o marcador base é sempre o mesmo, o autor propõe o uso de uma estrutura de grafos para interconectar marcadores que não são visíveis na cena ao mesmo tempo. Desta forma, se houver um caminho no grafo que os conecte através de outros marcadores, a relação entre ambos pode ser conhecida, sabendo as relações de cada aresta que conecta os marcadores do caminho. Um lado negativo deste tipo de abordagem é que em determinadas situações, a quantidade necessária de cálculo para se chegar ao resultado final pode

ser proibitiva. Quando um marcador é conectado com o marcador base por vários outros marcadores, as relações entre cada um dos marcadores, ligados par a par, devem ser conhecidas e multiplicadas umas com as outras, até que se chegue no resultado final, somando a isso o custo de se encontrar o menor caminho dentro do grafo. A abordagem proposta aqui permite que o marcador base varie de acordo com o campo de visão da câmera, de forma a garantir que o próximo marcador a ser eleito como base seja visível pelo marcador base anterior, fazendo com que a descoberta da transformação entre eles seja direta.

Em [5] foi proposto um método de calibração combinando um conjunto de marcadores planos com a técnica de ajustamento de feixes perspectivos (*bundle adjustment*), porém, apesar do método não exigir que o usuário meça as distâncias e as rotações dos marcadores, ele exige que se tenha algum conhecimento prévio sobre seu arranjo, por exemplo, quando os marcadores estão em um mesmo plano ou quando estão em planos diferentes mas são co-normais.

Em [7] foi desenvolvido um método que combina os sistemas de coordenadas independentes de todos os marcadores em um espaço projetivo único, e a partir desse, consegue calcular as relações entre cada um dos marcadores. Para construir o espaço projetivo, o sistema captura duas imagens aleatórias de posições diferentes do sistema em uma pré-estapa que, segundo os autores, dura cerca de 30 segundos. Ambas as imagens devem ser obtidas com todos os marcadores visíveis para que o espaço possa ser projetado. Esta restrição pode ser indesejável já que, em alguns casos, nem todos os marcadores são visíveis por duas tomadas de cena ou mesmo por uma única tomada. Além disso, este processo tem o inconveniente de exigir que o usuário passe por esta etapa de pré-execução antes de executar o sistema.

Em [1] foi proposto um método semi-automático de calibração, baseado também em imagens previamente tiradas e ajustamento de feixes perspectivos. O autor obteve experimentalmente um tempo de calibração igual a aproximadamente um segundo, onde seria possível avaliar até quarenta fotos e escolher o melhor par para realizar os cálculos. O trabalho desenvolvido em [4] revela um problema neste método que já foi citado aqui: ele só é eficiente quando todos os marcadores se encontram razoavelmente próximos, a ponto de ser possível que todos (ou quase todos) estejam visíveis na mesma imagem. Por isso, o autor propôs um método semelhante para grandes áreas, onde uma câmera navega pelo espaço capturando os marcadores e características naturais como quinas presentes e guarda as relações em uma base de dados.

III. MODELO PROPOSTO

O modelo proposto neste trabalho se baseia na ideia de que é possível extrair as relações entre dois marcadores distintos em tempo de execução. Tendo as relações sido previamente armazenadas em algum momento onde ambos

marcadores são visíveis ao mesmo tempo, é possível inferir a posição de um marcador invisível na cena, caso o outro continue visível.

A. Abordagem Utilizada

Neste trabalho foi utilizada a biblioteca ARToolKit. O ARToolKit é uma biblioteca livre e de código fonte aberto voltada para a Realidade Aumentada que propicia uma maior liberdade para execução de testes e coleta de resultados. O ARToolKit será usado aqui como rastreador dos marcadores visíveis, fornecendo como resultado final uma matriz de transformação, seguindo os mesmos modelos das matrizes do OpenGL, que transporta o espaço da câmera no espaço do marcador.

Dado que dois marcadores **A** e **B** estão presentes na cena e são detectados, e considerando que Ma_t e Mb_t simbolizam, respectivamente, as matrizes de transformação afim dos marcadores **A** e **B** em um tempo t , é possível calcular uma matriz Mba_t que fornece a relação de transformação rígida entre eles usando:

$$Mba = Mb^{-1} \times Ma \quad (1)$$

Neste caso, o resultado fornece a transformação necessária para levar o sistema de coordenadas de **B** até o referencial de **A**. Usando esta relação previamente calculada, é possível inferir a posição e orientação de um marcador que não é mais visível na cena no futuro. Usando ainda o exemplo dos marcadores **A** e **B**, suponha que num dado instante de tempo t pode-se calcular e guardar a matriz Mba_t , que representa a transformação de A no espaço de B e que num próximo instante de tempo $t + 1$, Ma_{t+1} deixe de ser conhecido. É possível estimar a matriz de A usando:

$$Ma_{t+1} = Mb_{t+1} \times Mba_t \quad (2)$$

Na prática, quando são calculadas as transformações de um marcador no espaço de outro, é comum que o resultado varie com o tempo e com a posição da câmera. Isso acontece porque o registro, mesmo quando feito com qualidade, é suscetível a erros e, de fato, levar em conta apenas uma transformação calculada não é uma boa estratégia. Por isso, além de guardar a relação absoluta do último quadro em que os dois marcadores foram visíveis, existem abordagens como a proposta por [6] que leva em conta os dados dos quadros anteriores, calculando a média ponderada entre eles usando a acurácia de cada marcador retornada pelo ARToolKit como peso. Esta abordagem, apesar de ser mais robusta que simplesmente guardar uma nova relação a cada novo quadro, ainda está suscetível a falhas quando, por exemplo, um marcador não está visível e é confundido com um objeto ou outro marcador. Se o objeto confundido com um marcador ocluso estiver em uma posição relativa extremamente diferente do marcador original o fato da nova e falsa distância ser grande, se comparado com a original,

faz com que o baixo peso na média seja compensado e o erro consiga afetar diretamente o cálculo final de relação entre os marcadores. Nesta mesma referência, os autores alertam sobre este problema e estabelecem em sua estratégia um valor máximo de erro para que a relação entre os marcadores naquele quadro seja levado em conta.

B. Sistema multimarcador sem calibração simples

Usando o conceito apresentado anteriormente, é possível construir um sistema simples, com apenas dois marcadores. Quando o marcador principal está visível, este projeta o objeto virtual normalmente e, se o outro marcador também estiver visível, a matriz de relação para este é guardada para ser usada futuramente. Quando o marcador principal deixa de ser visto, o sistema multiplica a matriz gerada pelo ARToolKit para o segundo marcador pela matriz que foi guardada previamente, conseguindo assim, manter a projeção sobre o primeiro marcador (Figura 1). Nesta configuração, o segundo marcador sempre terá sua posição calculada em relação ao marcador principal.

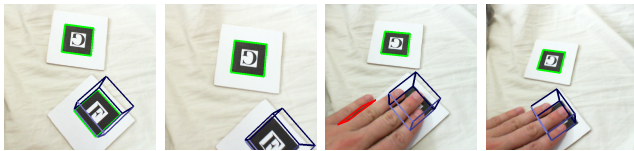


Figura 1. Exemplo de execução: O marcador onde é desejado projetar o cubo e marcador auxiliar são detectados. As relações entre eles são computadas. Com a oclusão do marcador principal, o sistema usa as relações previamente guardadas para tentar manter a projeção no mesmo lugar.

C. Sistema multimarcador sem calibração para vários marcadores

Nesta proposta, para construir um sistema que aceite vários marcadores ao invés de apenas dois, deve-se antes de tudo definir qual será a política de substituição do marcador base. Neste trabalho, será chamado de marcador base aquele marcador que vai controlar a cena no momento, ou seja, toda a estimativa de pose e posição do objeto virtual projetado será calculada em relação à este marcador, usando também os dados das relações previamente registradas. É natural de se esperar que, obrigatoriamente, o marcador base deve estar visível e a sua escolha deve ser feita de maneira cuidadosa, para que o resultado final seja o melhor possível. A cada novo quadro do vídeo, a qualidade de cada marcador visível é calculada segundo um critério a fim de definir qual deles controlará a cena. Na seção a seguir serão propostos alguns métodos de escolha do marcador base.

A Figura 2 descreve como é o funcionamento do sistema que, inicialmente, procura avaliar todos os marcadores visíveis na cena, sobre algum aspecto. Após eleger qual dos marcadores é o melhor, de acordo com os critérios a serem apresentados na Seção III-D, um teste simples confere se

este é igual ao marcador base do último quadro. Caso seja, as relações entre a base e todos os outros marcadores visíveis são recalculadas e o objeto é projetado usando o marcador base. Caso não seja, para evitar que o marcador base alterne repetitivamente entre os quadros quando a qualidade de dois marcadores é muito próxima, definiu-se que o melhor marcador da cena só será definido como nova base quando superar a qualidade do atual em pelo menos 10%.

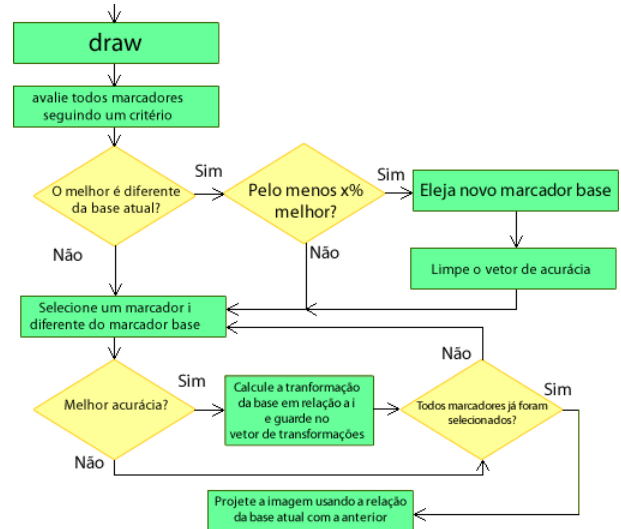


Figura 2. Fluxograma geral do multimarcador.

D. Métodos para escolha do marcador base.

Serão discutidas nesta seção algumas políticas de substituição de marcadores base. Será considerada $ArTrans^n$ a transformação dada pelo ARToolKit em um quadro específico fornecendo a matriz que leva o espaço da câmera ao espaço do marcador N . $Transf^n$ será a matriz calculada a cada quadro e que representa a relação entre o marcador N e a base anterior. C será o conjunto de todos os marcadores utilizados na aplicação.

1) *Marcador com menor inclinação em relação à câmera:* Segundo [3], o rastreamento é afetado pelo ângulo entre o marcador e a câmera. Quanto mais inclinado o marcador está em relação à câmera, menos visível é o centro do marcador e, logo, a estimativa de pose se torna menos confiável. Desta maneira, é possível calcular, dentre os marcadores visíveis, qual possui o menor ângulo de inclinação e usá-lo como próxima base.

Selecionar dentre os marcadores qual tem a menor inclinação é uma tarefa simples, tendo em vista que, pela construção da matriz de transformação do OpenGL e por lidarmos apenas com transformações rígidas, sem perspectiva, cisalhamento ou escalamento, podemos concluir com facilidade que quando o eixo Z do marcador e o eixo Z da câmera estão alinhados, o elemento $a_{3,3}$ da matriz retornada

pelo ARtoolkit se aproxima de 1, e os elementos da mesma linha e coluna que fazem parte do bloco linear se aproximam de 0.

Pode-se constatar a situação de maneira visual, usando a matriz de transformação do marcador para calcular a posição de dois pontos, $P1(0, 0, 0)$ e $P2(0, 0, 1)$ no espaço da câmera. Estes dois pontos juntos traçam um segmento de reta sobre o eixo Z do marcador que, quando projetados sobre a tela, permite comparar o quão inclinado o marcador está, a partir da distância entre duas projeções. (Figura 3).

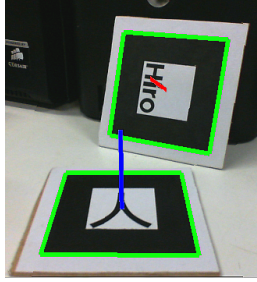


Figura 3. Marcador com menor inclinação projeta um segmento de reta menor na tela.

Considerando que há interesse apenas na orientação do marcador, pode-se desconsiderar o bloco de translação. Após a aplicação do bloco linear 3×3 da matriz, o ponto $P1$ será então $(0, 0, 0)$ e o ponto $P2$ será $(a_{1,3}, a_{2,3}, a_{3,3})$. Portanto, a distância entre ambos os pontos projetados no plano XY da tela será proporcional apenas ao módulo de $a_{1,3}$ e $a_{2,3}$. Pelo fato da matriz de rotação ser ortogonal, temos que $\|(a_{1,3}, a_{2,3}, a_{3,3})\| = 1$. Logo, minimizar o comprimento do segmento de reta projetado é equivalente a aproximar $a_{3,3}$ de 1. Desta forma, pode-se afirmar que quanto mais $a_{3,3}$ se aproxima de 1, menor é a inclinação do marcador em questão.

2) *Marcador com maior acurácia.*: O núcleo do ARToolKit, caracterizado pela função $ArGetTransMat$, que computa a posição da câmera em função dos marcadores detectados, trabalha tentando, de maneira iterativa, minimizar uma variável de erro. Quando o máximo de iterações indicadas pelo usuário é atingido, se a variável de erro não atingiu um valor aceitável (também configurável pelo usuário), a função retorna que o marcador não pode ser detectado.

Esta função, quando consegue detectar o marcador, retorna um valor que representa a confiança que aquela detecção representa. A confiança é calculada, basicamente usando $Conf \equiv \frac{1}{erro}$ onde o $erro > 0$ é a variável que foi minimizada no processo iterativo. Este valor pode ser usado como estimativa para a seleção de um marcador base.

3) *Marcador mais próximo da câmera.*: Selecionar como base o marcador mais próximo da câmera é um dos métodos propostos para reduzir erros e melhorar a qualidade da projeção, principalmente quando se pretende montar um ambiente onde os marcadores estão distantes entre si.

Para calcular a distância entre o marcador e a câmera é necessário buscar na matriz de transformação a coluna mais à direita, responsável pela translação. Com esta matriz é possível obter a distância euclidiana através da Equação 3.

$$\{\forall i | i \in C\} \Rightarrow D_i = \sqrt{\sum_{n=1}^3 (ArTrans_{n,4})^2} \quad (3)$$

4) *Marcador mais próximo da projeção.*: É comum notar nas aplicações de RA que usam marcadores fiduciais que quanto mais longe um objeto projetado fica do seu marcador, pior é a qualidade final do resultado. Isso é bastante óbvio, levando em consideração que as operações de rotação tem um efeito de deslocamento muito maior quando o objeto está mais distante da origem e que é praticamente inevitável que não hajam ruídos na detecção da pose e posição do marcador. Quanto mais a projeção é afastada do marcador, maior será a amplificação do erro, resultando em uma projeção tremida e que não transmite a sensação de realidade desejada.

Selecionar como marcador base o mais próximo da projeção diminui a incidência deste tipo de erro e é aplicável em situações onde há remoção dos marcadores da cena, principalmente o marcador central, onde o objeto virtual é inicialmente projetado. Para descobrir qual marcador está mais próximo do objeto projetado, inicialmente a matriz de transformação final é calculada como se o marcador base do quadro anterior não tivesse sido alterado ($Transf^{base}$), multiplicando a matriz de pose/posição dada pelo ARToolKit naquele quadro em específico pela matriz de transformação que foi calculada para o marcador base atual quando houve a última mudança de base. Em seguida, um método simples para cálculo da distância Euclidiana é utilizado, usando desta vez a matriz de transformação final e a de cada marcador diferente da base:

$$M = ArTrans^{base} \times Transf^{base}$$

$$\{\forall i | i \in C, i \neq base\} \Rightarrow D_i = \sqrt{\sum_{n=1}^3 (ArTrans_{n,4}^i - M_{n,4})^2} \quad (4)$$

E. Aplicações

O modelo proposto pode ser aplicado em qualquer circunstância onde a redundância de marcadores é benéfica, seja porque estão muito distantes; como é o caso abordado por [2]; seja porque os marcadores ficam em posições que são difíceis de mensurar, como é o caso abordado por [1] ou mesmo porque os marcadores ficam em posições onde há perigo de medir distâncias manualmente, por exemplo, marcadores que ficam em lados opostos de uma rua.

F. Correção de Erro

A proposta desenvolvida neste trabalho, por ser baseada em um sistema de rastreamento com características apenas visuais e também, está suscetível à cálculos incorretos, considerando os erros numéricos intrínsecos. Por exemplo, na Figura 4, o cubo inicialmente é projetado sobre o marcador **F** e, como é proposto, deveria continuar sendo projetado mesmo quando ocluso, usando o marcador **C**. Porém, é visível que o cubo não se alinha perfeitamente com o lugar onde supostamente estaria, sobre o marcador original.

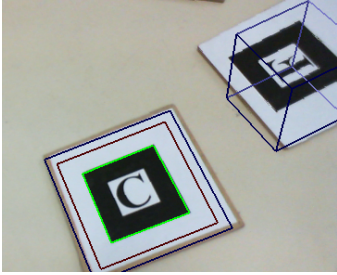


Figura 4. Exemplo de execução onde se há erro no resultado final.

Foi criada uma função que corrige este erro sempre que o marcador principal, onde o objeto é inicialmente projetado, estiver visível. Tal função foi desenvolvida com a intenção de fazer com que o objeto virtual retorne ao seu marcador de origem e deve agir de forma suave, para que este não se mova bruscamente de um lugar no espaço para outro. Por isso e devido à facilidade de representar interpolações de rotação com quatérnios, optou-se por estes à representação matricial na correção dos erros de rotação, corrigindo o erro de translação através de uma interpolação linear simples.

O cálculo da correção usa as funções *arUtilMat2QuatPos* e *arUtilQuatPos2Mat* do ARToolKit que fazem, respectivamente, a transformação da representação matricial para quatérnios e vice-versa. Ainda usando as definições de $ArTrans^n$ e $Transf^n$ dadas anteriormente, obtém-se inicialmente a matriz da projeção calculada:

$$M = ArTrans^{base} \times Transf^{base}. \quad (5)$$

Em seguida é gerada uma representação intermediária entre M e $ArTrans^P$, tal que P é o ID do marcador principal, onde o objeto é inicialmente projetado.

IV. RESULTADOS

A. Cálculo de Erro

Para o cálculo de erro de projeção deste trabalho, foram seguidas as propostas sugeridas por [7] e [6]. Nestas propostas, a qualidade é representada pela média das distâncias, em milímetros, entre os vértices do cubo projetado sobre o marcador usando os dados do próprio marcador e outro cubo projetado sobre ele (Figura 5), mas usando os marcadores auxiliares. Neste caso, considerando $n \in C$ o marcador onde

é desejado projetar o cubo inicialmente, e V_i as coordenadas do vértice i de um cubo projetado sobre a origem, pode-se calcular o erro através da Equação 6.

$$M = ArTrans^{base} \times Transf^{base}$$

$$e = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \|Transf^n \times V_i - M \times V_i\|_2 \quad (6)$$

Ou seja, a posição em coordenadas de câmera de cada aresta é calculada aplicando-as tanto à posição do marcador obtida diretamente quanto indiretamente e são computadas a diferença entre elas. O valor final é obtido realizando a média das distâncias de cada aresta.

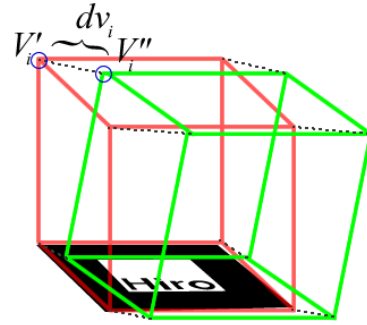


Figura 5. Cálculo de erro baseado na distância entre os vértices.

B. Comparação entre os métodos

Para comparar os métodos de seleção dos marcadores base, foram montados quatro vídeos de um minuto cada, usando configurações diferentes de marcadores, onde um cubo é projetado sobre um marcador central, sendo que este fica visível inicialmente e ocluso em alguns outros trechos. Ao final do vídeo, o marcador central volta a ser visível, para que seja possível calcular qual foi o erro final. Cada um dos vídeos foi executado pelo menos uma vez usando os métodos de seleção de base propostos e o resultado final guardado para comparação. Em cada vídeo, foram usados oito marcadores do Artoolkit.

No primeiro vídeo, os marcadores foram dispostos a uma distância relativamente curta entre eles, em um mesmo plano. O segundo vídeo foi semelhante ao primeiro com o marcador central sendo coberto no meio do vídeo. No terceiro vídeo, os marcadores foram dispostos a uma distância relativamente curta entre eles, alternando a inclinação de cada um. Finalmente no quarto vídeo os marcadores foram dispostos com uma maior distância entre eles, alternando a inclinação de cada um.

C. Resultados

Na Tabela I são comparados os resultados finais de cada método, usando o erro de cada um como comparação, sem a correção de erro durante a execução. É possível perceber

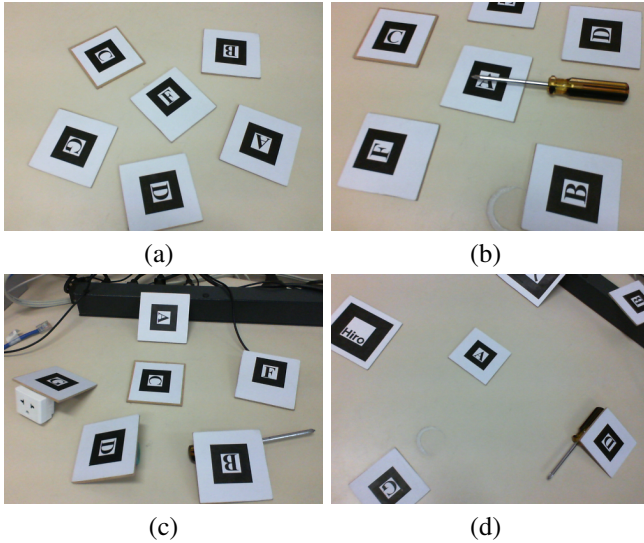


Figura 6. Configurações dos marcadores no vídeos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Tabela I
TABELA DE ERRO, EM MILÍMETROS, PARA EXECUÇÃO DE QUATRO VÍDEOS DIFERENTES.

	Vídeo 1	Vídeo 2	Vídeo 3	Vídeo 4
Acurácia	157.94	135.75	94.68	2711.85
Menor inclinação	53.40	39.06	258.65	513.16
Mais Próximo Câmera	165.69	48.09	132.42	958.41
Próximo da Projecção	170.00	23.77	48.01	276.28

claramente que a proposta de selecionar o marcador mais próximo da projeção se sobressaiu às demais, tendo sido a técnica com menor erro em três casos.

A Tabela II mostra o erro máximo obtido durante a execução de cada um dos métodos com os quatro vídeos diferentes, executando o método proposto de correção de erro. Observando a tabela, pode-se concluir que o método de seleção por marcador mais próximo da projeção também se sobressaiu em relação ao demais.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho descreveu uma abordagem que pode ser utilizada em sistemas de realidade aumentada baseados em múltiplos marcadores, sem a necessidade de fazer a calibração prévia das relações entre os marcadores que compoem o cenário. Quatro técnicas foram descritas para

Tabela II
TABELA DE ERRO MÁXIMO, EM MILÍMETROS, COM CORREÇÃO DE ERRO PARA QUATRO VÍDEOS DIFERENTES.

	Vídeo 1	Vídeo 2	Vídeo 3	Vídeo 4
Acurácia	68.57	80.78	62.95	772.67
Menor inclinação	76.98	58.27	36.21	539.68
Mais Próximo Câmera	40.69	60.32	44.80	723.48
Próximo da Projecção	35.90	44.90	44.80	207.73

resolver o problema de calibração automática e uma métrica de erro foi utilizada para avaliá-las.

Observou-se que o melhor dos cenários se dá quando o marcador escolhido como alvo da projeção está mais ao centro em relação aos outros e é visível por maior tempo durante a execução. Logo, a proposta aqui elaborada é recomendada em situações onde o marcador principal esteja visível na maior parte do tempo. Isto não implica, necessariamente, sua visibilidade durante toda a execução do sistema.

Nos resultados experimentais, pode-se perceber que a qualidade final está diretamente ligada à distância entre os marcadores, sendo esta abordagem não recomendada quando se pretende criar uma aplicação em RA para ambientes externos. Dentre os métodos de seleção de marcador base, os resultados experimentais nos levam a crer que a seleção por marcador mais próximo da projeção é a melhor alternativa na maioria dos casos.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Barattoff, A. Neubeck, and H. Regenbrecht. Interactive multi-marker calibration for augmented reality applications. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR '02*, pages 107–, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [2] M. Kalkusch, T. Lidy, M. Knapp, G. Reitmayr, H. Kaufmann, and D. Schmalstieg. Structured visual markers for indoor pathfinding, 2002.
- [3] H. Kato. Artoolkit 2.33 documentation (alpha version), 2005. [Online; acessado em 21-Outubro-2011].
- [4] M. Klopschitz and D. Schmalstieg. Automatic reconstruction of wide-area fiducial marker models. In *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR '07*, pages 1–4, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.
- [5] D. Kotake, S. Uchiyama, and H. Yamamoto. A marker calibration method utilizing a priori knowledge on marker arrangement. In *Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR '04*, pages 89–98, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [6] Siltanen, Hakkarainen, and Honkamaa. Automatic marker field calibration. In *Virtual Reality International Conference (VRIC2007)*, pages 261–267, 2007.
- [7] Y. Uematsu and H. Saito. Ar registration by merging multiple planar markers at arbitrary positions and poses via projective space. In *Proceedings of the 2005 international conference on Augmented tele-existence, ICAT '05*, pages 48–55, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [8] L. Wang, M. Springer, T. H. Heibel, and N. Navab. Floyd-warshall all-pair shortest path for accurate multi-marker calibration. In *ISMAR*, pages 277–278. IEEE, 2010.