

MARCOS AURÉLIO BASSO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
REALIDADE AUMENTADA EM AMBIENTES EXTERNOS
PARA VISUALIZAÇÃO DE MODELOS VIRTUAIS
GEORREFERENCIADOS**

CURITIBA

2011

MARCOS AURÉLIO BASSO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
REALIDADE AUMENTADA EM AMBIENTES EXTERNOS
PARA VISUALIZAÇÃO DE MODELOS VIRTUAIS
GEORREFERENCIADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para grau de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Daniel Rodrigues dos Santos

CURITIBA

2011

B322

Basso, Marcos Aurélio

Desenvolvimento de um protótipo de realidade aumentada em ambientes externos para visualização de modelos virtuais georreferenciados / Marcos Aurélio Basso. – Curitiba, 2011. 69 f.; il. Color.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 2011.

Orientador: Daniel Rodrigues dos Santos

Bibliografia: p. 67-69.

1. Realidade aumentada. 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Geomática. I. Santos, Daniel Rodrigues dos. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD: 526.9

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCOS AURÉLIO BASSO

*"DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE REALIDADE AUMENTADA EM
AMBIENTES EXTERNOS PARA VISUALIZAÇÃO DE MODELOS VIRTUAIS
GEORREFERENCIADOS"*

Dissertação nº 250 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Selma Regina Aranha Ribeiro
Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 29 de setembro de 2011.

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai Rozimbo Basso e minha Mãe Enedina Maria Basso, e também aos meus irmãos Roseslane, Gilmara, Jean e Dean pelo apoio e compreensão. Sem a ajuda deles seria muito difícil a realização deste trabalho.

Agradecimentos

- Agradecer principalmente a meu orientador o Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos, pelo carinho e dedicação durante a orientação deste trabalho.
- Ao professor Centeno apesar de não ser meu orientador me auxiliou com valiosas dicas no qual aprendi muito com sua sabedoria.
- Aos professores do Programa de Pós Graduação de Ciências Geodésicas (Silvio Freitas, Hideo Araki, Quintino Dalmolin, Claudia Hobbi), que através das disciplinas deram suporte para a realização deste trabalho. Como também o
- Professor Luiz Veiga e Pedro Fagion em dispor os equipamentos do LAIG.
- Também gostaria de agradecer a todos os meus professores do curso de Engenharia Cartográfica da UFPR e finalmente, agradeço meus colegas do CPGCG que me auxiliaram diretamente ou indiretamente na realização deste trabalho. Principalmente ao amigo Henry Montecino e Wander da Cruz na realização dos testes em campo.
- E também agradecer a secretaria Monica pela sua alegria e disposição em atender os alunos.

Epígrafe

"Vivemos
no mundo do irreal
onde tudo o que vemos é
somente uma sombra imperfeita
de uma realidade mais perfeita ".

Platão

Resumo

Neste estudo apresenta-se uma proposta metodológica para construção de um protótipo de Realidade Aumentada (RA) para visualização de modelos virtuais em escala 1:1 em ambientes externos. A RA é uma tecnologia baseada na sobreposição harmônica do cenário do mundo real (MR) registrado a partir de sensores de imageamento com o cenário do mundo virtual (MR) gerado por computação gráfica em tempo real. Nesta pesquisa foram explorados três aspectos relevantes em RA, a saber: o problema da integração dos sensores; o problema da determinação dos parâmetros de orientação interior (OI) da Webcam e de seus parâmetros de orientação exterior (OE); e a viabilidade do método para ambientes externos. O sistema desenvolvido está equipado com um sensor inercial de baixo custo integrado a um receptor GPS de dupla frequência, uma Webcam e um óculos de visualização HMD. A criação do cenário virtual foi feita com uso de dados LiDAR, e arquivos CAD e a qualidade da visualização está associada à precisão dos equipamentos usados no sistema. Os parâmetros de OI foram definidos a partir da calibração da Webcam, os parâmetros de OE são definidos em tempo real, para isso foram usados os sensores de navegação e posicionamento supracitados para determinar diretamente a orientação e posição do usuário no momento da visualização do cenário. Dois experimentos foram realizados e os resultados obtidos mostraram a viabilidade do uso do sistema para estudos em ambientes externos.

Palavras-chave: Realidade Aumentada, Realidade Virtual, sensores de navegação e posicionamento, LiDAR.

Abstract

This research implements and demonstrates a methodology for building an outdoor augmented reality prototype for visualization of virtual models in 1:1 scale. The AR system combines the interactive real world with an interactive computer-generated world in such a way that they appear as one environment in real time. As the user moves around the real object, the virtual (i.e. computer generated) one reacts as it is completely integrated with the real world. In this research has been explored three important aspects in augmented reality system: the problem of sensors's integration; the problem of determining the video camera's parameters of interior orientation and its parameters of exterior orientation; and the viability of the method for outdoor environments. The developed system is equipped with a low-cost inertial sensor integrated with a dual frequency GPS receiver, a Webcam and a Head Mounted Display with special glasses. The development of the virtual models was made with LiDAR data and CAD files. The quality of the visualization is associated with the accuracy of equipment used in the system. The interior orientation parameters were defined from the camera calibration, the parameters of external orientation were defined in real time. For that were used the navigation and positioning sensors to directly determine the orientation and position of the user when viewing the scene. Two experiments were conducted and the results showed the system viability for outdoor environment.

Keywords: augmented reality, virtual reality, navigation and positioning sensors, LiDAR.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 A) CENÁRIO DO MUNDO REAL; B) USUÁRIO EQUIPADO COM DISPOSITIVOS DE RA; C) RESULTADO DA IMAGEM HÍBRIDA	24
FIGURA 2.2 CONCEITO DE CONTINUM VIRTUAL	25
FIGURA 2.3 SISTEMA CLÁSSICO DE REALIDADE AUMENTADA	28
FIGURA 2.4 PIPELINE DA FORMAÇÃO DA IMAGEM DO MR	33
FIGURA 2.5 SISTEMA IMU BASEADO EM PLATAFORMA STRAPDOWN	36
FIGURA 2.6 MÉTODO DE POSICIONAMENTO RTK	38
FIGURA 2.7 PIPELINE DA FORMAÇÃO DA IMAGEM DA CÂMERA VIRTUAL	43
FIGURA 2.8 GEOMETRIA DA CÂMERA PERSPECTIVA DA OPENGL	44
FIGURA 3.1 UNINADE DE MEDIÇÃO INERCIAL INERTIACUBE 3	47
FIGURA 3.2 GPS RTK TOPCOM HIPER LIGTH PLUS	48
FIGURA 3.3 ÓCULOS HMD I-GLASSES	49
FIGURA 3.4 SENSOR ÓPTICO WEBCAM CREATIVE COM QUADRO FOCAL DE 640X480	49

FIGURA 3.5	NOTEBOOK TOSHIBA SATELLITE	50
FIGURA 3.6	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE RA EM AMBIENTES EX- TERNOS	51
FIGURA 3.7	Modelos Virtuais desenvolvidas em CAD	52
FIGURA 3.8	Sistemas de Coordenadas Envolvidos	53
FIGURA 4.1	IMAGENS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO	55
FIGURA 4.2	GRÁFICO DE DISTORÇÕES RADIAIS DAS LENTES DA WEB- CAM CREATIVE	56
FIGURA 4.3	GEOMETRIA DA CÂMERA PERSPECTIVA DA OPENGL	58
FIGURA 4.4	A) IMAGEM DE ALTIMETRIA POR MEIO DO LIDAR DA ÁREA DE ESTUDO; B)IMPORTAÇÃO DOS OBJETOS EM FORMATO DE ARQUIVOS 3DS PARA O SISTEMA;	59
FIGURA 4.5	FREQUÊNCIA DE QUADROS COM A TUBULAÇÃO VIRTUAL	60
FIGURA 4.6	(A) DESLOCAMENTO PARA ESQUERDA; (B) RETORNO	61
FIGURA 4.7	A)LOCALIZAÇÃO DOS TESTES NO CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR, B) USUÁRIO COM DISPOSITIVOS DO SISTEMA RA; B) USUÁ- RIO EQUIPADO COM DISPOSITIVOS DE RA; C) RESULTADO DA IMAGEM HÍBRIDA	62
FIGURA 4.8	Programa Ativado contendo informações do observador	63

FIGURA 4.9 a) Visão inicial do usuário; b) visão do observador quando se desloca para frente; c) novo ponto de vista do usuário girando a cabeça para direita; d) com o observador se deslocando novamente para frente, mas em outra direção; e) observador girando a cabeça para direita. E (f) nota-se a dimensão das maquetes virtuais em relação aos transeuntes caminhando pelo campus. 64

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DA WEBCAM CALIBRADOS	56
TABELA 4.2 PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DA WEBCAM NA IMAGEM DE TESTE	57

Lista de Siglas

MV	mundo virtual
ISPRS	<i>(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing)</i>
PDA's	<i>Personal Digital Assistants</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
HMD	head-mounted display
HUD	head-up display
NAVSTAR	<i>NAVigation Satellite with Time And Ranging</i>
RTK	Real Time Kinematic
RA	Realidade Almentada
RV	Ralidade Virtual
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
MEMS	<i>Micro-Electro- Mechanical Systems</i>
POI	parâmetros de orientação interior
POE	parâmetros de orientação exterior
OpenGL	<i>Combuper Graphcs Library</i>

Lista de Símbolos

f	distância focal
S_x e S_y	fatores de escala
u	coordenada do sistema imagem em coluna
v	coordenada do sistema imagem em linha
X_e, Y_e, Z_e	coordenadas (<i>eye</i>) do observador
X_P, Y_P, Z_P	coordenadas do ponto P no espaço objeto
$fovy$	ângulo de abertura da câmera virtual
u_c, v_c	coordenadas no sistema imagem corrigidas
t_x, t_y, t_z	parâmetros de translação
$height$	numero de pixels do <i>frame</i> em linha
$width$	numero de pixels do <i>frame</i> em coluna
tp_x	tamanho do pixel em relação ao eixo x
tp_y	tamanho do pixel em relação ao eixo y
X_d, Y_d, w_d	coordenadas homogêneas da imagem distorcida
X_i, Y_i, w_i	coordenadas homogêneas da imagem ideal
k	coeficiente de distorção
P_1, P_2	coeficiente de distorção tangencial
$aspect$	razão entre $\frac{height}{width}$
ω, φ, κ	parâmetros de rotação
r_{ij}	elementos da matriz de rotação

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	18
1.2	OBJETIVOS GERAIS	20
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	21
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
2.2	REALIDADE AUMENTADA E REALIDADE VIRTUAL	24
2.2.1	Vantagens e Desvantagens da RA em Relação à RV	25
2.3	SISTEMAS CLÁSSICOS DE RA	27
2.3.1	Principais problemas de desempenho num sistema de RA	29
2.3.2	Tecnologias de visualização em um sistema de RA	29
2.4	SISTEMA DE RA EM AMBIENTES EXTERNOS	31
2.5	SENSORES UTILIZADOS EM SISTEMAS DE RA EM AMBIENTE EX- TERNOS	31
2.5.1	Sensores Óticos	32
2.5.2	Unidade de medição inercial –IMU	35
2.5.3	Sistema de Posicionamento Global –GPS	36
2.6	CALIBRAÇÃO DO SENSOR ÓPTICO	39
2.7	CÂMERA VIRTUAL DA OPENGL	42

2.8	CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS POI DO SENSOR ÓPTICO E DA CÂMERA VIRTUAL DA OPENGL	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1	MATERIAIS.....	47
3.1.1	Recursos de hardware	47
3.1.2	Recursos de Software.....	49
3.2	MÉTODOS.....	50
3.2.1	Desenvolvimento do Sistema	50
3.2.2	Gerenciamento das Informações 3D	51
3.2.3	Projeção 2D	52
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	55
4.1	RESULTADO DA CALIBRAÇÃO E DA CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS POI'S DA WEBCAM E DA CAMERA VIRTUAL DA OPENGL	55
4.2	EXPERIMENTO 1: VISUALIZAÇÃO DOS DUTOS VIRTUAIS	58
4.3	EXPERIMENTO 2: VISUALIZAÇÃO DA MAQUETE VIRTUAL	61
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	65
5.1	CONCLUSÃO	65
5.2	RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	66
	Referências Bibliográficas	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tendo em vista o alto custo e o complexo gerenciamento e processamento de dados, assim como o elevado tempo de resposta inerente às tomadas de decisões em projetos de engenharia, uma vez que, diversas etapas são necessárias para a produção de mapas e cartas topográficas, a realidade aumentada (RA) emergiu como uma alternativa consideravelmente atrativa para aplicações nas Ciências Geodésicas. Além disso, destaca-se a frequente necessidade da interação homem/máquina em tempo real e com visualização tridimensional, visto que os principais sistemas de análise e manipulação de dados, no mercado atual, têm focalizado suas demandas neste novo paradigma de conversa/resposta em forma digital.

A RA é uma tecnologia que tem sido difundida e aplicada em diversas áreas do conhecimento, tais como: medicina, robótica, fotogrametria, em diversos ramos da engenharia e também nas Ciências Geodésicas. Nas Ciências Geodésicas, especificamente, os sistemas RA têm sido utilizados para visualização de mapas aumentados (BOBRICH; OTTO, 2002) e Sistemas de Informações Geográficas (KING; PIEKARSKI; THOMAS, 2005).

A RA se baseia na superposição harmônica de objetos do mundo real (MR) com objetos do mundo virtual (MV) MV gerados por computador, em tempo real. Nas Ciências Geodésicas, sua principal vantagem é o incremento da percepção visual humana para auxiliar o usuário na tomada de decisões, uma vez que o mesmo pode fornecer informações que não são explícitas ou não existem no MR.

O principal problema de um sistema de RA é o registro espacial das imagens oriundas do MR e do MV, uma vez que a compatibilização espacial entre os dois mundos é necessária para que seja causada a impressão, ao usuário, que os objetos do MV realmente existam no MR. Para isto, devem ser determinados os parâmetros de orientação interior (POI) e os parâmetros de orientação exterior (POE) da câmera.

Os POI são responsáveis pela reconstrução da geometria interna da câmera, que são determinados por meio de técnicas de calibração de câmeras. Os POE definem a posição e orientação da câmera real, no espaço, em relação a um sistema referencial, geralmente, determinados em tempo real. Isto pode ser feito através da integração de sensores de navegação e posicionamento, isto é: uma unidade de medição inercial (em inglês, *Inertial Measurement Unit* - IMU) e o sistema de posicionamento por satélites GPS (em inglês, *Global Positioning System*). A técnica de integração consiste em determinar diretamente a rotação e a posição da câmera, no momento da aquisição da imagem, em tempo real. Os efeitos sistemáticos inerentes à qualidade dos dispositivos usados na aquisição dos dados espaciais e o atraso no sistema oriundo do tempo de aquisição, armazenamento, processamento e *feedback* necessários para respostas do sistema em tempo real. Estes efeitos devem ser tratados de forma que não seja afetada a performance do sistema, principalmente, quando são executadas aplicações em tempo real.

Com o surgimento dos dispositivos MEMS (em inglês, *Micro-Electro-Mechanical Systems*) de posicionamento e navegação, os sistemas RA ganharam exequibilidade e flexibilidade, em função do menor peso, tamanho e custo dos sensores a serem envolvidos na composição dos sistemas supracitados. Anteriormente ao desenvolvimento de tais dispositivos MEMS, o desenvolvimento de sistemas RA era factível apenas para aplicações estáticas. Também, se pode destacar as vantagens oriundas do avanço da tecnologia digital, que possibilita o acesso rápido e direto aos dados digitais, a reutilização da mídia de gravação e controle da qualidade dos dados em tempo real, além de alta qualidade radiométrica e espacial, proporcionada pelos modelos de câmaras mais modernas.

Por outro lado, existe uma perda na qualidade das informações adquiridas com sensores de tecnologia MEMS e, neste caso, se torna necessário combinar sensores de alta precisão com aqueles derivados da tecnologia supracitada, uma vez que as vantagens dos dispositivos de alta precisão podem suprir as desvantagens daqueles de baixa precisão. O que ainda garante o desenvolvimento de um sistema RA eficiente, para algumas aplicações em Ciências Geodésicas.

Dentro do contexto apresentado, o aspecto fundamental tratado neste trabalho foi a análise da exequibilidade do uso de sensores de navegação desenvolvidos com tecnologia MEMS integrado com um GPS de duas frequências (L1,L2), com a modelagem da orientação interior de uma *Webcam*. Para isso, um protótipo de RA foi desenvolvido para aplicações em realidade aumentada, voltado para visualização de modelos virtuais georreferenciados.

Para garantir a confiabilidade métrica do sistema, foi aplicado o algoritmo de calibração desenvolvido por Zhang (2000), uma vez que o dispositivo de aquisição das imagens em tempo real é realizado por uma Webcam, cuja instabilidade geométrica deve ser devidamente tratada.

Considerando o desenvolvimento do sistema RA, algumas aplicações se destacam com grande potencialidade, como nas áreas de análise ambiental e monitoramento de desastres naturais e antrópicos; visualização de modelos virtuais georreferenciados e tubulações em geral, constantemente requeridas por órgãos públicos de médio e pequeno porte.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a exequibilidade de um sistema RA composto por dispositivos de navegação, posicionamento e imageamento para visualização de modelos virtuais georreferenciados em ambiente externo.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em vista do objetivo geral do trabalho, os objetivos específicos são os que seguem:

- Desenvolver um protótipo de RA formado por dispositivo MEMS, GPS de alta precisão e câmera de vídeo de baixo custo;¹⁷
- Desenvolver algoritmos para o cálculo dos POE em tempo real através de observação direta dados derivados dos sensores de posicionamento e navegação (GPS/IMU) no mundo virtual;
- Desenvolver algoritmos para a criação do ambiente virtual com dados LiDAR;
- Estudar formas de fusão da cena do mundo virtual (OpenGL) com o mundo real (câmera);
- Calibrar a câmera para determinação dos POI e fazer a correspondência destes parâmetros com a câmera virtual da OpenGL; e
- Avaliar a qualidade geométrica do IMU e câmera e seus efeitos na imagem híbrida;
- Realizar experimentos práticos para averiguar a viabilidade de aplicação do sistema.

1.4 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A construção de maquetes tanto as tradicionais quanto as virtuais é uma atividade básica para o planejamento do espaço. A vantagem de desenvolver um protótipo de RA para a visualização de maquetes virtuais poderá proporcionar uma maior interatividade a um futuro projeto de engenharia. Casas, edifícios, pontes poderão ser representados virtualmente em verdadeira escala no ambiente em que serão construídas no mundo real, proporcionando um melhor planejamento a priori seja de viabilidade econômica ou impacto ambiental.

A tecnologia de RA por muito tempo se limitou a ser aplicada em ambientes internos, mas nas últimas décadas com o avanço tecnológico dos sensores de navegação inercial e GPS possibilitou a aplicação da RA em ambientes externos. Mas apesar dos níveis de precisão alcançados por estes dispositivos a RA em ambiente abertos ainda é uma tarefa complexa, isso se deve por diversos fatores como a integração de dados destes sensores em tempo real, e a impossibilidade do controle total do usuário sob o ambiente do MR, a dinâmica do MR, como pessoas e veículos se deslocando, e a variação de iluminação e clima.

Outro ponto importante a ser verificado é que apesar da RA ser uma tecnologia emergente e ser objeto de estudo em diversas empresas, centros de pesquisas e universidades em diversas partes do mundo; no Brasil, tem sido pouco explorado o desenvolvimento técnico-científico de sistemas que integram sensores de imageamento e navegação para aplicações em tempo real e também para RA. Outras razões que justificam o desenvolvimento deste trabalho são: a demanda por desenvolvimento de novos sistemas RA para abordagens cartográficas em âmbito nacional; o desenvolvimento e aquisição do conhecimento de novas tecnologias e sensores, para fins de monitoramento e tomada de decisão; e a relevância científica comprovada, devido à importância dispensada pela ISPRS Commission V Close-Range Sensing: Analysis and Applications; aos objetos de estudo deste trabalho.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- No *capítulo 1* será apresentada as considerações gerais, os objetivos gerais e específicos e a justificativa do estudo;

- O *capítulo 2* apresenta uma revisão de literatura que fornece embasamento para o desenvolvimento do tema proposto;
- No *capítulo 3* serão abordados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do tema proposto;
- No *Capítulo 4* são mostrados os experimentos realizados para verificação da qualidade da Webcam, IMU e do resultado da imagem híbrida;
- No *capítulo 5* são apresentados as conclusões e considerações finais do trabalho, bem como as recomendações para trabalhos futuros;
- E finalmente no *capítulo 6* são listadas as referencias bibliográficas utilizadas para a realização do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cenário do MR oferece uma riqueza de detalhes que é difícil de modelar computacionalmente. Isto é comprovado pelos cenários desenvolvidos no MV. Ou esses mundos são muito simplistas, tais como os cenários desenvolvidos para jogos eletrônicos, cidades ou maquetes virtuais, ou são qualificados como sistemas de Realidade Virtual (RV) mais sofisticados, onde são criados ambientes mais realistas, tais como sistemas simuladores de voo. Em compensação, chegam a custar milhões de dólares. Já um sistema de RA gera uma visão híbrida para o usuário sem a necessidade de uma modelagem detalhada do MR.

A RA é uma área em desenvolvimento na pesquisa de Realidade Virtual (RV). Segundo Azuma (1997) define a RA como "*a tecnologia que se baseia na fusão de estímulos (visual, sonora ou tátil) gerados por computador com dados reais, mantendo um relacionamento espacial entre os dados físicos e sintéticos permitindo a interação do usuário em tempo real*". Os campos de aplicação da RA são imensos, pois o aumento da realidade para o usuário melhora seu desempenho na realização de tarefas ou na tomada de decisões. O avanço tecnológico tem tornado os sistemas de RA mais flexíveis, leves, menores e com preços reduzidos e diversos são as áreas do conhecimento que têm se beneficiado destas vantagens, dentre elas podemos citar: a medicina (SIELHORST et al., 2004); a manutenção de máquinas e hardwares (FEINER et al., 1997); a construção civil (BEHZADAN; KAMAT, 2005) e a robótica (GREEN et al., 2008); entretenimento (THOMAS et al., 2000); suporte a turista (FEINER et al., 1997); apoio didático (LIMA; CUNHA; HAGUENAUER, 2008); arqueologia (PORTALÉS; LERMA; NAVARRO, 2010); simulações de inundações (COELHO, 2004). O objetivo final da RA é criar um sistema de tal forma que não seja perceptível ao usuário a diferença entre o MR e o MV. Ou seja, a imagem híbrida resultante deve simular uma situação real. Figura 2.1 mostra um exemplo da aplicação de um sistema de RA em ambientes externos desenvolvido por Vlahakis et al. (2002) para a visualização de sítios arqueológicos.

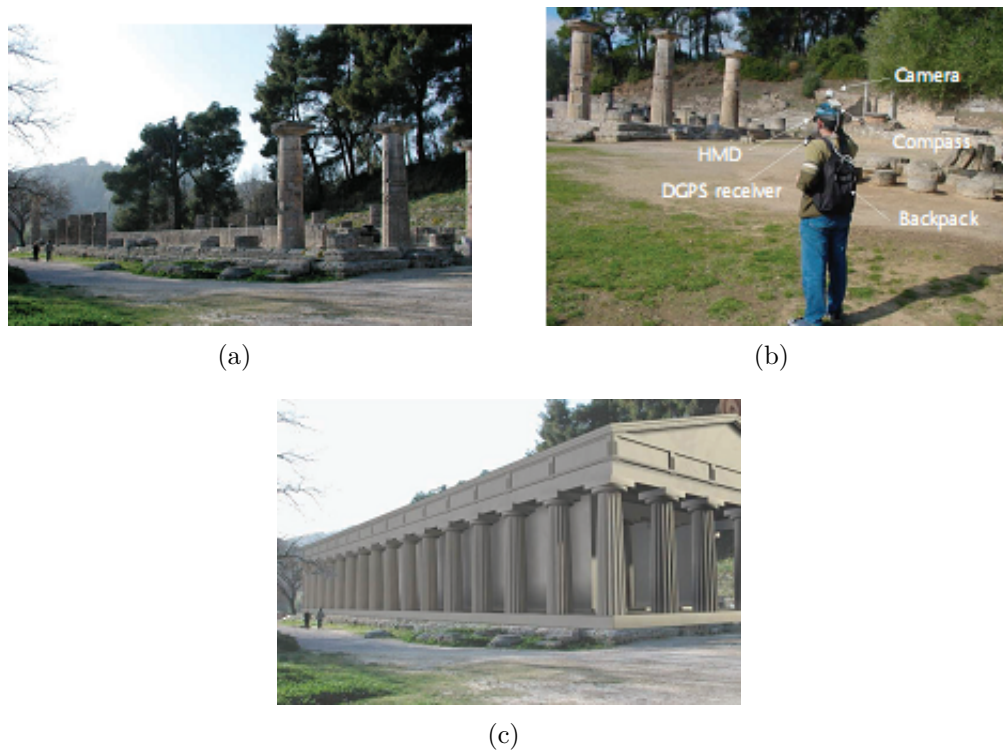


FIGURA 2.1 – A) CENÁRIO DO MUNDO REAL; B) USUÁRIO EQUIPADO COM DISPOSITIVOS DE RA; C) RESULTADO DA IMAGEM HÍBRIDA
 FONTE: Vlahakis et al. (2002)

A Figura 2.1 (a) mostra as ruínas de uma construção grega antiga do sítio arqueológico *Greece Olympia*, na Figura 2.1 (b) mostra o usuário com sensores instalados como câmeras de vídeos, unidade de medição inercial (IMU) e GPS, Figura 2.1 (c) apresenta o resultado da imagem híbrida composto por elementos do MR e MV, os elementos virtuais são aqueles inexistentes no MR construídos com recursos computacionais e inseridos em tempo real.

2.2 REALIDADE AUMENTADA E REALIDADE VIRTUAL

Como descrito acima, a RA é uma variante da Realidade Virtual (RV). Enquanto a RV se ocupa em inserir o usuário em um mundo totalmente construído pelo computador, interrompendo-o de qualquer contato com o MR, a RA permite que o usuário esteja em contato com o MR através da sobreposição harmônica dos objetos virtuais com o MR. Para melhor definir o contexto da RA, Milgram e Kishino (1994) propuseram o conceito de continuum virtual, que relaciona as diferentes classes dos objetos apresentados numa dada cena. Conforme é apresentado na Figura 2.2 se percebe que no extremo deste conceito temos MR e no outro extremo o MV.

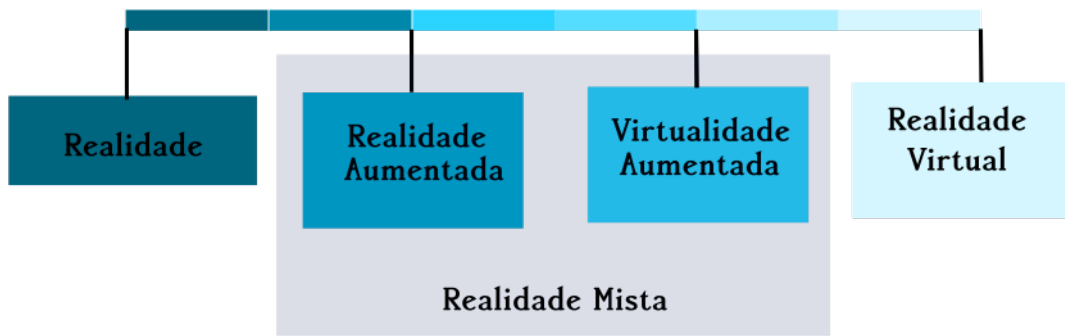


FIGURA 2.2 – CONCEITO DE CONTINUM VIRTUAL

FONTE: Adaptado de Milgram e Kishino (1994)

O MR é definido pelo ambiente que está em nossa volta, cuja cena é registrada apenas por sensores de imageamento ou óculos translúcidos. Enquanto a outra extremidade é constituída por objetos virtuais. Tal como está ilustrado, a RA está englobada no conceito de Realidade Mista, mas encontra-se mais próximo do MR do que do MV. Alguns pesquisadores definem a RA como dependente do uso de HMDs, o que limita os sistemas de RA. Então Azuma (1997) propôs que os sistemas de RA possuam três critérios básicos, a saber:

- Combina o real e o virtual;
- Interatividade em tempo real;
- Registro em 3D;

Portanto, estes critérios permitem que outras tecnologias além de HMDs sejam englobadas pela RA, tais como *tablets* e *smatphones*. Mas, ao mesmo tempo estes critérios eliminam certas tecnologias que não se enquadram na RA, como por exemplo, filmes e edições de vídeo, uma vez que não interagem com o usuário.

2.2.1 Vantagens e Desvantagens da RA em Relação à RV

Com a tentativa de documentar os pontos fortes e fracos de cada paradigma de visualização, esta seção destaca as vantagens e desvantagens dos sistemas de RA, quando comparados a RV. As *vantagens* dos sistemas de RA comparadas aos sistemas de RV incluem (AZUMA, 1997), (FEINER et al., 1993), (ROMÃO et al., 2004):

- A redução de esforço computacional para geração de imagens reais. (Sistemas de Realidade Virtual requerem cálculos intensos para gerar uma imagem real e sinté-

tica da realidade. Por outro lado, sistemas de RA só geram gráficos aumentados (geralmente vetores);

- O uso da realidade como imagem de fundo produz uma visão mais realística do ambiente; O usuário permanece conectado com o mundo real porque está imerso nele; e
- RA oferece a possibilidade de utilizar uma variedade de dispositivos incluindo computadores portáteis de tamanho reduzidos mas de grande capacidade de processamento denominados PDAs(Personal Digital Assistants) e telefones celulares para viabilizar a RA de uma forma não-imersiva, possibilitando a recuperação de informação de forma eficiente e permitindo realizar tarefas comuns e pela primeira vez, com o mínimo de erros (HARINGER; REGENBRECHT, 2002).

Os benefícios da RA são percebidos quando as informações baseadas em localização estão disponíveis, criando um conhecimento espacial, um ambiente rico em informação (REITMAYR; SCHMALSTIEG, 2004). Apesar de toda a aplicação da RA estar apresentada em um ambiente virtual, a RA eleva o nível de realismo através da imersão do usuário em um ambiente aumentado, realista.

Enquanto uma quantidade substancial de pesquisas são feitas, as dificuldades inerentes a combinação de dados oriundos de vários sensores, cuja aquisição é feita em tempo real, é um problema na RA moderna (SCHMALSTIEG et al., 2007). Desta forma, as desvantagens são as que seguem: Ainda não é possível a geração de imagens virtuais de alta qualidade gráfica que são indistinguíveis da realidade, em tempo real. MacIntyre, Coelho e Julier (2002) descreve uma série de tarefas comuns, que incluem:

- destacar; rotular; adicionar novos objetos; e fornecer pistas visuais ao manipular objetos em um espaço físico; que não são facilmente implementadas em sistemas de RA;
- Aumentar o mundo real com informações virtuais pode resultar em poluição visual, degradando a visualização (AZUMA et al., 2001).
- A falta de capacidade de processamento em pequenos dispositivos de computação faz com que seja necessário realizar tarefas complexas (como o reconhecimento da imagem e sua representação 3D) para servidores remotos. Em um sistema móvel de RA, isto requer acesso a uma rede sem fio para transferir os dados necessários entre o servidor e os clientes.

São mais difíceis de produzir e manter dados para aplicações em RA porque são usados em um ambiente dinâmico (REITMAYR; SCHMALSTIEG, 2004). A precisão dos sensores utilizados no registro dos dados afeta o realismo da experiência aumentada (SCHMALSTIEG et al., 2007). Para visualizar os dados relativos à paisagem, de forma aumentada, é necessário alinhar os gráficos virtuais com características reais da superfície (terreno, fachada, telhado, etc). Em terrenos com pouca definição topográfica, o impacto da RA pode ser perdido, dada a baixa visão perspectiva, o que pode resultar em uma quantidade mínima visível de dados aumentados.

Embora isso também possa ocorrer em um ambiente virtual, o usuário tem a capacidade de alterar a sua perspectiva, aumentando a sua elevação ou movendo-se facilmente para um local diferente. A fim de tornar os sistemas de RA acessíveis, os sistemas têm que ser intuitivos para o uso por pessoas não treinadas (LEDERMANN; SCHMALSTIEG, 2005).

2.3 SISTEMAS CLÁSSICOS DE RA

A RV do sistema padrão procura imergir totalmente o usuário em um ambiente gerado computador. Este ambiente é mantido pelo sistema em um frame, ou quadro de referência registrado no sistema gráfico do computador que cria a apresentação do MV.

Para esta imersão ter eficiência, o quadro de referência mantido pelo corpo do usuário deve ser registrado com a referência do MV. Isso requer que as propostas ou alterações feitas pelo usuário resultarão em mudanças apropriadas no MV percebido. Porque o usuário está olhando para um mundo virtual não há nenhuma conexão natural entre estes dois quadros de referência e uma ligação deve ser criada (AZUMA, 1993).

Um sistema de RA pode ser considerado o melhor sistema de imersão. A principal tarefa é registrar o quadro de referência virtual com aquele que o usuário está vendo. Este registro é mais crítico e complexo em um sistema de RA em relação ao RV. Em virtude de o usuário ser mais sensível a distorções visuais do que com o tipo cinestésica (conjunto de informação fornecido pelos sensores) de erros de visão que pode resultar em um sistema de RV padrão. A Figura 2.3 apresenta os vários quadros de referência que devem ser relacionados em um sistema de RA.

A cena do MR é registrado por um sensor de imageamento que, neste caso, é descrito como uma câmera real. A câmera real faz uma projeção em perspectiva do mundo 3D em um plano imagem 2D. Os POI (distância focal, distorção da lente e deslocamento do

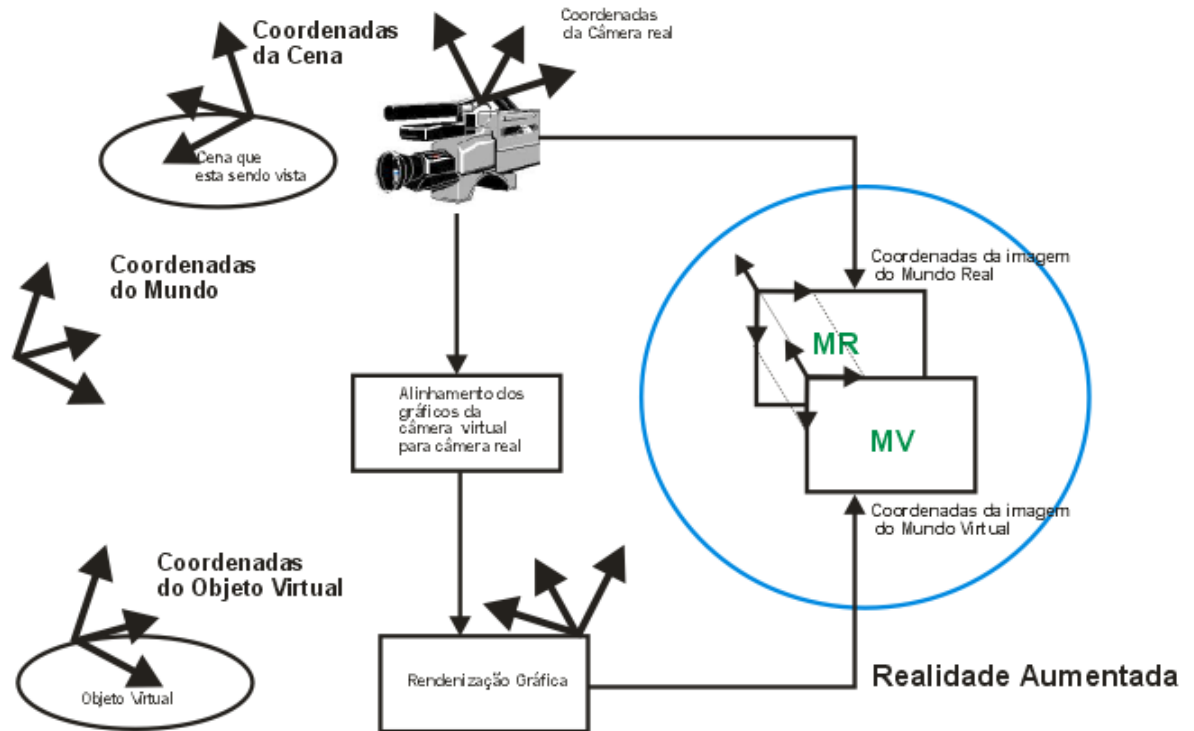


FIGURA 2.3 – SISTEMA CLÁSSICO DE REALIDADE AUMENTADA
 FONTE: Adaptado de Vallino (1998)

ponto principal) e os POE orientação da câmera (posição e rotação) modelam a formação da imagem no plano.

A geração da imagem virtual é feita com os critérios de um sistema de Computação Gráfica. Os objetos do MV são modelados em um quadro de referência de objeto. O sistema gráfico requer informações sobre a imagem do MR para que ele possa processar corretamente esses objetos. Estes dados irão controlar a câmera virtual que é usada para gerar a imagem do MV. Esta imagem é, então, fundida com a imagem da cena real para formar a imagem híbrida da RA.

As imagens do MV e renderização gráfica descrita acima é relativamente simples. As atividades de investigação que tange a RA gira em torno de dois aspectos básicos. Um deles é desenvolver metodologias para registrar os dois conjuntos distintos de imagens e mantê-los registrados em tempo real. Alguns trabalhos estão começando a fazer uso de técnicas de visão computacional. O segundo é baseado em tecnologia de *displays* para geração da imagem híbrida.

2.3.1 Principais problemas de desempenho num sistema de RA

O que se espera de um sistema de RA é que seja executado em tempo real para que um usuário seja capaz de se mover livremente dentro da cena e ver uma imagem híbrida, devidamente sobreposta. Isso implica em dois critérios de desempenho do sistema. São eles:

- Taxa de atualização para gerar a imagem híbrida: Visualmente a restrição de tempo real se manifesta quando o usuário visualiza uma imagem ampliada, cujos objetos do MV são apresentados sem saltos visíveis. Para aparecer *sem saltos*, uma regra padrão é que o sistema gráfico deve ser capaz de processar a cena virtual pelo menos 10 vezes por segundo (AZUMA, 1997). Isto está dentro da capacidade dos atuais sistemas gráficos como OpenGL e DirectX. A tecnologia da computação gráfica atual não suporta, totalmente, cenas complexas com iluminação, sombras e imagens *Ray-trace*¹. Mas geralmente a maioria das aplicações em RA não é muito complexa ou não exigem um nível elevado de fotorealismo;
- Precisão do registro da imagem real e virtual: As Falhas neste critério de desempenho têm duas causas possíveis. A primeira é um erro de registro da do MR e MV por causa de ruído ou imprecisão dos sensores utilizados. A posição e orientação da câmera em relação à cena do MV será sentida. Qualquer ruído na medição dos POE tem o potencial para ser exibido como erros no registro da cena do MV com a imagem da cena MR. Oscilações de valores enquanto o sistema de RA está em execução irá causar tremulação na imagem híbrida a ser visualizada. O sistema visual humano é muito sensível a estes erros, que neste caso seria a percepção de que o objeto virtual não está parado na cena do MR ou está posicionado incorretamente. A segunda causa de erro de registro é o atrasos no cálculo da posição da câmera ou o alinhamento correto da câmera, em seguida, os objetos gráficos aumentados tende a ficar para trás movimentos na cena MR;

2.3.2 Tecnologias de visualização em um sistema de RA

A combinação de objetos do MR e do MV em uma única cena apresenta grandes desafios técnicos para os pesquisadores de sistemas de RA e como fazer a fusão de duas imagens é uma decisão que o desenvolvedor deve tomar (VALLINO, 1998). A seção 2.2

¹ é um algoritmo de computação gráfica usado para processar imagens tridimensionais *fotorealísticas*

discutiu os aspectos que Milgram e Kishino (1994) usaram para classificar os sistemas de RA. A sensação de presença do usuário está diretamente relacionada ao tipo de visor que é utilizado. Um sistema de RA pode ser classificado em 4 grupos conforme o dispositivo de visualização empregada, são eles (AZUMA, 1993):

- *Baseado em monitor*: A imagem híbrida é visualizada diretamente na tela do computador. Nesse sistema de visualização o usuário tem pouca sensação de imersão, outra desvantagem é sua aplicação em ambientes externos, pois a luminosidade dificulta a interpretação da imagem híbrida. Porém, esta tecnologia é a mais simples disponível e de custo mais acessível.
- *Baseados em sistemas ópticos opacos ("Video See-Trough")*: Para incrementar a sensação de imersão são empregados os vídeo-capacetes HMD (em inglês, *Head Mounted Display*).

Estes dispositivos têm sido amplamente empregados em sistemas de RA, pois permite ao usuário o completo isolamento visual do ambiente circundante. Como a tela é visualmente isolada, o sistema deve usar câmeras de vídeo que estão alinhadas com o visor para obter a visão do MR.

- *Baseados em sistemas ópticos transparentes ("Optical See-Trough")*: visualização é composta por óculos transparentes, sobre os quais imagens são projetadas mediante a feixes LASER. A vantagem reside na viabilidade de projetar o ambiente virtual diretamente sobre a cena do mundo real percebida pelo olho. Em vez disso a fusão do MR e MV é feita visualmente na frente do usuário. Esta tecnologia é similar ao HUD (em inglês, *heads-up displays*), que comumente aparecem nos "cockpits" de aviões militares e, recentemente, em alguns protótipos de automóveis;
- *Baseados em projetores ("Projector Based")*: Neste tipo de sistemas, imagens ou texturas virtuais são projetadas na superfície de objetos reais.

Existem vantagens e desvantagens para cada tipo de "display" e são discutidos em maiores detalhes por (AZUMA, 1997). A principal desvantagem do sistema de RA, que depende do sensor de imageamento, está em relação ao atraso na formação da imagem híbrida. Mas tem como vantagem fornecer dados que auxiliem na orientação e posição do usuário no MV. Já o sistema baseado em see-through não apresenta problemas de atraso na formação da imagem híbrida, mas tem como desvantagem utilizar apenas sensores acoplados sob o usuário, para a determinação da sua posição e orientação.

2.4 SISTEMA DE RA EM AMBIENTES EXTERNOS

Um sistema de RA pode ser classificado como para ambientes externos, quando realizado ao ar livre. Este tipo de sistema tende a ser mais complexo em relação a um sistema RA realizado em ambientes internos. Sendo que o registro tridimensional nesses ambientes vem sendo na atualidade um dos maiores desafios em sistemas de RA. A integração entre sensores ópticos, IMU e GPS em tempo real ainda é problema, pois a perda de precisão na determinação dos parâmetros de OE interfere na qualidade de visualização e interpretação do usuário na imagem híbrida, fornecida pelo sistema. A complexidade em desenvolver um sistema de RA em ambientes externos se deve a diversos fatores, tais como: o usuário não ter controle completo do ambiente, ou seja, é inviável recobrir uma grande área com marcadores fiduciais, o tamanho dos dispositivos utilizados são grandes o que causa certo desconforto para o usuário, o GPS pode ter problemas de multicaminhamento, quando próximo a edificações ou entre árvores, os IMU de tecnologia MEMS apresentam problemas de deriva, esse erro aumenta conforme o seu tempo de navegação.

2.5 SENSORES UTILIZADOS EM SISTEMAS DE RA EM AMBIENTE EXTERNOS

Existem diversos tipos de sensores para a determinação a posição e orientação do usuário no MV. Em trabalho pioneiros de RA desenvolvido por Sutherland (1968), foram empregados sensores mecânicos. Conceitualmente são os sensores com abordagem mais simples (WELCH; FOXLIN, 2002), no entanto, são bastante restritivos no que diz respeito aos movimentos utilizados inviabilizando seu emprego em grandes espaços como ocorre em ambientes externos.

Outro conjunto de sensores empregados em sistemas de RA são os sensores acústicos. O funcionamento deste tipo de sensores baseiam-se em duas técnicas, por *Time-Of-Flight* e por diferença de fase (WELCH; FOXLIN, 2002). Na *Time-Of-Flight* um ou mais sensores acústicos enviam um pulso ultrassom que é recebido por vários microfones (sensores acústicos receptores). A distância entre os dois pontos é determinado pelo tempo entre o envio e recebimento do sinal que é calculado como base na velocidade do som. Na técnica de diferença de fase são necessários pelo menos três emissores e três receptores para se conseguir a determinação dos POE do usuário. As principais vantagens dos sensores acústicos é seu baixo custo, não é afetado por interferências magnéticas, e o seu peso é

reduzido. No entanto, tem como desvantagens sua sensibilidade a interferências de ruído ultrassom, possui baixa precisão em razão da velocidade do som variar de acordo com as condições do ambiente como obstáculos, tornando-os inviáveis a aplicações de sistema de RA em ambientes externos.

Os marcadores fiduciais ou óticos tem por finalidade identificar a imagem rastreada como também a determinação da posição e orientação de cada imagem, tornando elementos chave na identificação do espaço para o processo de registro do MR com o MV. Esses marcadores podem ser impressos muito facilmente, e seu reconhecimento é imediato. Basta que uma câmera capture uma imagem dos marcadores fiduciais, que possuem uma forma geométrica fixa. Mas seu emprego em ambientes externos os torna inviável, pois a colocação destes marcadores em uma grande área tornaria a tarefa muito onerosa.

Conforme os sensores supra citados eles apresentam restrições para determinar a posição e orientação do usuário em ambientes externos. Os sensores mais empregados são os sensores óticos (câmeras), para a captura das imagens do cenário do mundo real, o IMU para determinação da posição e orientação do usuário, e o GPS para determinação do observador.

2.5.1 Sensores Óticos

Atualmente os sensores óticos, ou simplesmente câmeras digitais são os mais usados e os mais precisos, a maior desvantagem deles é a oclusão, que só pode ser contornada com o uso de várias câmeras, levando para outra desvantagem: o alto custo do hardware. Outro problema é que para rastrear bem, o campo de visão das câmeras deve estar livre de reflexos e brilhos.

Os sensores óticos fazem a captura da imagem do cenário do MR, projetam a imagem em 3D para a projeção 2D. Usualmente quatro sistemas de coordenadas são envolvidos na formação do processo da imagem do MR, as coordenadas do ponto no espaço objeto (X_p, Y_p, Z_p) ; coordenadas do centro perspectivo da câmera (X_0, Y_0, Z_0) coordenadas do sistema imagem (u, v) . A Figura 2.4 ilustra a sequência de estágios de como um ponto no espaço objeto é transformado para o sistema digital.

Analisando a pipeline representado na Figura 2.4, a matriz denominada M_W contem os POE fornecidos composto pela orientação e posição da câmera no espaço, a matriz M_{OP} contem os POI, definidos pelos métodos de calibração. Desta forma, podem-se determinar as seguintes equações, a saber (LI, 2001):

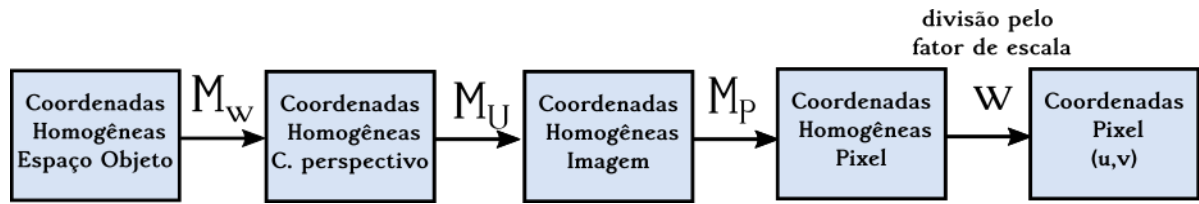


FIGURA 2.4 – PIPELINE DA FORMAÇÃO DA IMAGEM DO MR
 FONTE: Adaptado Li (2001)

$$M_W = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X_0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y_0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$M_U = \begin{bmatrix} \frac{1}{tp_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{tp_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$M_P = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Levando em consideração o modelo de câmera pinhole, a projeção do ponto P no espaço $3D$ para o sistema de pixels é definido pela Equação 2.4, como segue:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = M_U * M_P * M_W \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde:

X_P, Y_P, Z_P : coordenadas tridimensionais do ponto no espaço objeto;

X_0, Y_0, Z_0 : coordenadas do centro perspectivo da câmera;

f : distância focal;

tp_x : tamanho físico do pixel em relação ao eixo X ;

tp_y : tamanho físico do pixel em relação ao eixo Y ;

r_{ij} são os elementos da matriz de rotação, dado em função dos ângulos eulerianos (ω, ϖ, κ) , definido por:

$$\begin{aligned}
r_{11} &= \cos(\varphi)\cos(\kappa); \\
r_{12} &= \cos(\omega)\text{sen}(\kappa) + \text{sen}(\omega)\text{sen}(\varphi)\cos(\kappa); \\
r_{13} &= \sin(\omega)\text{sen}(\kappa) - \cos(\omega)\text{sen}(\varphi)\cos(\kappa); \\
r_{21} &= \cos(\varphi)\text{sen}(\kappa); \\
r_{22} &= \cos(\omega)\cos(\kappa) - \text{sen}(\omega)\text{sen}(\varphi)\text{sen}(\kappa); \\
r_{23} &= \text{sen}(\omega)\cos(\varphi) + \cos(\omega)\text{sen}(\varphi)\text{sen}(\kappa); \\
r_{31} &= \text{sen}(\varphi); \\
r_{32} &= -\text{sen}(\varphi)\cos(\phi); \\
r_{33} &= \cos(\omega)\cos(\varphi)
\end{aligned}$$

Diferentes configurações do sistema de coordenadas e parâmetros da câmera normalmente resultam em diferentes equações de transformação. A Equação 2.4 é obtida supondo que a visualização da câmera é direta e o sistema de coordenadas O_{XY} , O_{uv} tem a mesma direção. A câmera também pode apontar para o eixo Z positivo. A inversão da direção das câmeras só muda -1 na matriz M_P em 1 porque o plano da imagem muda de $Z_0 = -f$ para $Z_0 = f$. Às vezes, os eixos da coordenada de imagem e do sistema de coordenadas de pixels têm direções opostas. Neste caso, não precisa alterar a matriz de transformação porque tp_x e tp_y terão o sinal apropriado para acomodar a inversão de eixos.

É importante notar que a distância focal efetiva f não é a mesma que a impressa na câmera real da lente. Portanto, f é apenas um parâmetro no modelo de câmera pinhole, enquanto a distancia focal da câmera real é um parâmetro para o modelo de câmera de espessura-lente. Às vezes, o comprimento focal efetivo pode ser fatorado na matriz M_U , e teremos outra forma de distancia focal $f_x = \frac{f}{tp_x}$, $f_y = \frac{f}{tp_y}$. Estritamente falando, a distância focal agora muda para 1. Desta forma, f_x e f_y apenas servem como dois fatores de escala.

Até agora, foi considerado o modelo de câmera como uma pinhole perfeita, ou seja, sem qualquer distorção. Mas para um modelo de câmera mais precisa, a distorção radial deve ser então considerada. Tal distorção faz com que os pontos de imagem se desloquem radialmente para ou para o centro da imagem. Considerando que a coordenada da imagem ideal é $(X_i, Y_i, w_i)^T$, e a distorcida é $(X_d, Y_d, w_d)^T$. Então modela-se a distorção radial da seguinte forma:

$$\frac{X_d}{w_d} = \frac{X_i}{w_i}(1 + kr_d^2) \quad (2.5)$$

$$\frac{Y_d}{w_d} = \frac{Y_i}{w_i} (1 + kr_d^2) \quad (2.6)$$

$$r_d^2 = \left(\frac{X_d}{w_d} \right)^2 + \left(\frac{Y_d}{w_d} \right)^2 \quad (2.7)$$

Dado X_i, Y_i, w_i e k (coeficiente de distorção radial), o raio de distorção r_d pode ser resolvido pela Equação 2.7, denotando:

$$\lambda = 1 + kr_d^2 \quad (2.8)$$

Então inclui-se o termo λ na matriz M_{i1} , realizando as seguintes mudanças $\frac{1}{tp_x}$ para $\frac{\lambda}{tp_x}$ e $\frac{1}{tp_y}$ para $\frac{\lambda}{tp_y}$, respectivamente.

2.5.2 Unidade de medição inercial –IMU

A Unidade de Medição Inercial (IMU) foi desenvolvida especificamente para equipar navios, submarinos e aviões na década de 50. Na Ciências Geodésicas os posicionadores inerciais foram bastante empregados para determinação de coordenadas geodésicas na superfície física da Terra (FREITAS; GEMAEL, 1980). Mas devido ao seu alto custo e tamanho, foi uma das ultimas tecnologias empregados em sistemas de RV. Mas Com o advento da tecnologia MEMS, nos anos 90, estes dispositivos começaram a ser menores e ter seu preço reduzido (WELCH; FOXLIN, 2002)

Originalmente os sistemas IMU eram construídos em uma plataforma gimbal estabilizados para um quadro específico de navegação de referência, usando giroscópios para impulsionar os motores *cardan* em um *loop* de retroalimentação.

Atualmente a maioria das IMU é denominada *strapdown* (ver Figura 2.5), onde três acelerômetros e três giroscópios são instalados sobre eixos ortogonais coincidentes em uma mesma base rígida (TITTERTON; WESTON, 2004). Os eixos dos acelerômetros e giroscópios devem ser paralelos para que possam realizar transformações de coordenadas.

Como qualquer sensor, os giroscópios e acelerômetros apresentam erros em suas medidas. Tais erros apresentam componentes determinísticos que precisam ser estimados e compensados, e componentes aleatórios que precisam ser modelados e filtrados. Os principais componentes de erro são: bias, fator de escala, bias, desalinhamento, erro de quantização (SANTANA et al., 2004).

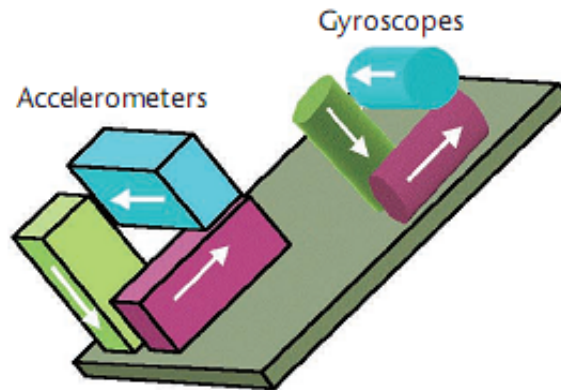


FIGURA 2.5 – SISTEMA IMU BASEADO EM PLATAFORMA STRAPDOWN
 FONTE: Adaptado Welch e Foxlin (2002)

- Bias: um erro de bias pode ser dito como sendo de um nível de sinal constante ou que varia muito lentamente, este tipo de erro ocorre geralmente quando é ligado e religado o sensor;
- Fator de escala: trata-se de um erro que é proporcional ao sinal de entrada. Entretanto, erros desse tipo geralmente exibem algum grau de não linearidade;
- Desalinhamento: refere-se ao desalinhamento mecânico entre os eixos. Idealmente, os giroscópios e acelerômetros definem uma base ortogonal concebida como estrutura de plataforma, mas na prática isso é impossível de se obter
- Erro de Quantização: os sinais de saída dos acelerômetros e giroscópios de um navegador inercial são obtidos em instantes discretos de tempos. Isto produz um ruído na saída que é proporcional a magnitude da quantização.

2.5.3 Sistema de Posicionamento Global –GPS

O receptor GPS é um dispositivo bastante empregado em sistemas de RA em ambientes externos. O usuário dotado de uma antena GPS poderá determinar sua localização em qualquer parte da superfície física da Terra ou próxima dela.

O conceito fundamental do GPS se baseia-se na medida do que é chamado de pseudo-distância entre cada um dos quatro satélites e o receptor. Com essa configuração, apenas 3 satélites seriam suficientes para determinar a posição, pois haveria um sistema linear de 3 equações a 3 incógnitas (X, Y e Z). Tendo pelo menos 4 satélites - de uma constelação de 24, intervisíveis em relação ao receptor, desde que não haja obstáculos

que provocam desvios na trajetória do sinal advindo dos satélites, em relação ao receptor. Mas erros no sincronismo do relógio do receptor em relação aos satélites exigem que uma nova equação seja adicionada ao sistema.

Com isso, é possível o posicionamento em tempo real e a qualquer instante, dentro de um intervalo discreto de tempo, sendo o menor intervalo de tempo, nos receptores mais comuns, de 1 em 1 segundo, ou múltiplos inteiros de 1s. Esta atualização de leitura de sinal a cada 1s pode acarretar problemas de registro entre os objetos MR com o MV em um sistema de RA, quando o usuário se desloca em um período de tempo menor 1s. Uma alternativa a ser utilizada é através dos dados do acelerômetros do IMU. Logo que o IMU tem uma taxa de atualização maior que a do GPS.

Há vários tipos de técnicas de posicionamento GPS, isto é: o absoluto; o relativo; e o diferencial. Para propiciar coordenadas com precisão da ordem milimétrica ou centimétrica, a técnica de posicionamento deve ser baseada no método relativo, com a utilização de dois receptores. Para reduzir efeitos relativos à ionosfera e troposfera é necessário que pelo menos um deles seja de dupla frequência, e que este, esteja fixado sobre um ponto com coordenadas conhecidas. O uso de um rastreador GPS de dupla frequência para a medição de coordenadas em um procedimento relativo-cinemático tem a vantagem da redução do tempo de rastreio e da precisão em relação ao uso de um rastreador de uma frequência. A técnica de posicionamento relativo só tem eficiência na minimização dos erros envolvidos nas observáveis GPS quando o receptor da base conhecida possui distância máxima de 20 km em relação ao receptor móvel.

Conforme Monico (2007) mas fontes e erros inerentes ao GPS são:

- Erros relacionados com os satélites: erros orbitais, erros nos relógios, relatividade, atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite;
- Erros relacionados com a propagação do sinal: refração troposférica, refração ionosférica, multicaminhamento ou sinais refletidos (Multipath), perdas de ciclos, rotação da Terra;
- Erros relacionados com o receptor e a antena: erro do relógio, erros entre os canais (interchannel biases), centro de fase da antena;
- Erros relacionados com a estação: erro nas coordenadas, multicaminhamentos, maré terrestres, movimento do pólo, carga dos oceanos, pressão da atmosfera.

Posicionamento Relativo Cinemático em Tempo Real

O posicionamento relativo em tempo real denominado Real-Time Kinematic (RTK) tem sido muito empregado em sistemas de RA em ambientes abertos, pois permite ao usuário determinar a sua posição acurada em tempo real. Esse método pode alcançar precisão centimétrica, sem a necessidade de pós-processamento dos dados, desde que a solução das ambiguidades obtida for confiável (DAI et al., 2003). No entanto, o uso do RTK possui algumas deficiências: com o aumento do comprimento da linha de base os resultados são degradados, pois os erros de ionosfera, troposfera e órbita dos satélites obtidos pelo usuário reduzem sua correlação, chegando ao ponto de inviabilizar o posicionamento (ALVES,). No posicionamento RTK são utilizados dois receptores coletando dados continuamente conforme mostra a Figura .

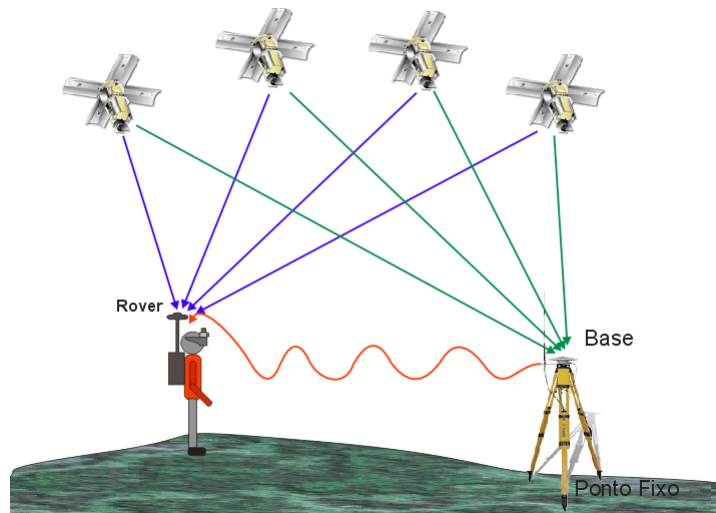


FIGURA 2.6 – MÉTODO DE POSICIONAMENTO RTK
 FONTE: O Autor (2010)

Um dos receptores é denominado estação de referência (base) e fica posicionado sobre um ponto de coordenadas conhecidas. O outro receptor (receptor móvel), localizado nas proximidades, coleta dados nos pontos de interesse do usuário para determinação da posição em tempo real.

Segundo Monico (2007) e Seeber (2003) a tecnologia RTK é baseada nas seguintes características, a saber:

- Transmissão em tempo real dos dados de fase da onda portadora e pseudodistância da estação base para estação móvel ou das correções das observáveis;
- Resolução das ambigüidades para linha de base entre a estação base e o móvel com solução quase instantânea on the fly;

- Determinação confiável do vetor da linha de base em tempo real.

No entanto, no posicionamento RTK, os erros envolvidos no processo (ionosfera, troposfera e órbita dos satélites), são proporcionais ao comprimento da linha de base, o que restringe a distância entre a estação de referência e o usuário a poucos quilômetros.

2.6 CALIBRAÇÃO DO SENSOR ÓPTICO

A calibração de câmeras é um procedimento fundamental nos levantamentos fotogramétricos e na visão computacional, segundo Eisenhart (1963) calibrar é uma maneira refinada de realizar medidas. Pois é neste procedimento que permite estimar os parâmetros que definem a projeção de um ponto tridimensional no espaço-objeto com o seu correspondente homólogo no espaço-imagem. Os referidos parâmetros incluem a geometria interna e óptica da câmara denominados POI composto pela distância focal, deslocamento do ponto principal e distorções de lentes. E através da calibração também são determinados os parâmetros de posicionamento e orientação da câmera no espaço tridimensional denominados POE. A utilização de sensores ópticos devidamente calibrados possibilita a redução de erros sistemáticos relacionados com a obtenção da posição e orientação tridimensional do sensor. Em RA a calibração é um procedimento imprescindível. Pois os POI também irão orientar intrinsecamente a câmera virtual da OpenGL.

Em conjunto, os POI e POE definem as condições de formação de uma imagem; ou seja, a transformação associada à projeção de pontos 3D do espaço imagem, de coordenadas (X, Y, Z) , em pontos 2D da imagem, de coordenadas (x', y') , conforme mostra a Equação 2.9 (ZHANG, 1999):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fS_x & \tau & x_0 \\ 0 & fS_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Onde:

x' e y' : as coordenadas do ponto p' no espaço-imagem;

X, Y e Z : as coordenadas do ponto correspondente no espaço-objeto;

x_0 e y_0 : as coordenadas do ponto principal;

τ : o fator de não-ortogonalidade entre os eixos da câmera;

f : a distância focal da câmera;

S_x e S_y : os fatores de escala em X e Y ;

r_{ij} : corresponde aos elementos da matriz de rotação em função dos ângulos de Euler(ω , φ , κ) com $i = j = 1, \dots, 3$;

t_x , t_y e t_z são os parâmetros de translação e $(.)$ é o operador de multiplicação.

Ainda é necessário considerar os coeficientes de distorção do sistema de lentes da câmera (distorção radial e descentrada), como segue (BROWN, 1992):

$$\delta_x = \bar{x}(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y}^2 \quad (2.10)$$

$$\delta_y = \bar{y}(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1\bar{x}\bar{y}^2 \quad (2.11)$$

Sendo \bar{x} e \bar{y} as coordenadas do ponto no espaço-imagem corrigidas das distorções radiais simétricas e descentradas, dado por $\bar{x} = x' - x_0$ e $\bar{y} = y' - y_0$; $r = \sqrt{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}$; os coeficientes de distorção radial das lentes k_1, k_2, \dots, k_n e os termos da distorção descentrada P_1 e P_2 .

A relação entre os pontos no espaço-imagem e seus correspondentes no espaço-objeto é obtida usando um plano padrão. Usualmente, um tabuleiro de xadrez é empregado como campo de calibração e, por este motivo, a coordenada Z é inserida como injunção com valor igual a *zero*. A injunção imposta define uma transformação projetiva entre o campo de calibração e o plano da imagem. Desta forma, o ponto $\bar{p} = (\bar{x}, \bar{y})$ no espaço-imagem e seu correspondente $P = (X, Y, 1)$ no espaço-objeto são representados por coordenadas homogêneas, como segue (ZHANG, 1999):

$$s.p = H.P \quad (2.12)$$

Conforme Hartley e Zisserman (2003) a Equação 2.12 é dado por s um fator de escala, e a matriz homográfica H definida como $H = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}$. O elemento A , é o primeiro termo da Equação 2.9, r_1 e r_2 elementos da primeira e segunda coluna da matriz de rotação e t o vetor de translação.

Como uma das finalidades da calibração é determinar simultaneamente os POE de cada imagem, isto é realizado a através da Equação 2.12, segundo (ZHANG, 1999) através da matriz H , fazendo:

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \end{bmatrix} = sA \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Segundo (ZHANG, 1999) r_1 e r_2 são vetores ortogonais, obtêm-se duas restrições básicas nos POI, dada a condição:

$$h_1^T A \frac{1}{A^T} A^{-1} h_2 = 0 \quad (2.14)$$

$$h_1^T A \frac{1}{A^T} A^{-1} h_1 = h_2^T A \frac{1}{A^T} h_2 \quad (2.15)$$

Sendo $B = A^T * A^{-1}$ uma matriz simétrica, é possível definir os elementos de B pelo vetor $bz = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]^T$. Seja o i -ésimo vetor coluna da matriz homográfica $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$, chega-se então:

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T \quad (2.16)$$

onde $v_{ij} = [h_{i1}h_{j1} \ h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1} \ h_{i2}h_{j2} \ h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} \ h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \ h_{i3}h_{j3}]^T$.

Assim, a partir das Equação 2.14 e Equação 2.15, para cada imagem capturada obtêm-se duas equações homogêneas, como segue (ZHANG, 1999):

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22}) \end{bmatrix} bz = 0 \quad (2.17)$$

E finalmente, para determinar os POI é necessário encontrar os valores do vetor bz através da Equação 2.17, no qual significa resolver um sistema da forma $V \cdot bz = 0$, sendo V uma matriz de dimensões $2n \times 6$, sendo n o número de imagens capturadas. Para a determinação das coordenadas do ponto principal u_0 e v_0 (sistema imagem) é dado a seguinte fórmula:

$$v_0 = \frac{(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} \quad (2.18)$$

$$u_0 = \frac{\tau v_0}{fS_y} - \frac{B_{13}fS_x^2}{\tau} \quad (2.19)$$

Para o cálculo do fator de escala s é empregado a seguinte equação:

$$s = \frac{B_{33} - (B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}))}{B_{11}} \quad (2.20)$$

Para calcular os fatores de escala fS_x e fS_y em relação ao eixo X e Y respecti-

vamente, é utilizado as seguintes equações:

$$fS_x = \sqrt{\frac{s}{B_{11}}} \quad (2.21)$$

$$fS_y = \sqrt{\frac{sB_{11}}{B_{11}B_{12} - B_{12}^2}} \quad (2.22)$$

O fator de não similaridade τ entre os eixos é calculado pela equação:

$$\tau = -B_{12}fS_x^2 \frac{fS_y}{s} \quad (2.23)$$

Segundo Zhang (1999) os POE da câmera é determinado através das seguintes equações:

$$r_1 = \lambda A^{-1}h_1 \quad (2.24)$$

$$r_2 = \lambda A^{-1}h_2 \quad (2.25)$$

$$r_3 = r_1 \otimes r_2 \quad (2.26)$$

$$t = \lambda A^{-1}h_3 \quad (2.27)$$

Sendo, $\lambda = \frac{1}{\|A^{-1}h_1\|} = \frac{1}{\|A^{-1}h_2\|}$ e o operador do produto vetorial. Vale ressaltar que outra solução para a determinação da matriz de rotação pode ser encontrado em Golub e Loan (1996).

2.7 CÂMERA VIRTUAL DA OPENGL

Enquanto o sensor óptico faz o transformação do cenário do MR para a imagem 2D, a câmera virtual faz o mesmo procedimento para o cenário do MV. O sensor ótico baseia-se em princípios físicos e a câmera virtual em princípios matemáticos. A câmera virtual da biblioteca gráfica OpenGL tem como definição específica os modelos de câmera ortogonal e perspectiva, para aplicações de RA será aplicado o modo perspectivo. Diferente do sensor ótico, a câmera virtual aponta para o eixo Z negativo. Os estágios

Consecutivos da transformação geométrica perspectiva da câmera virtual estão ilustrados na Figura 2.7.

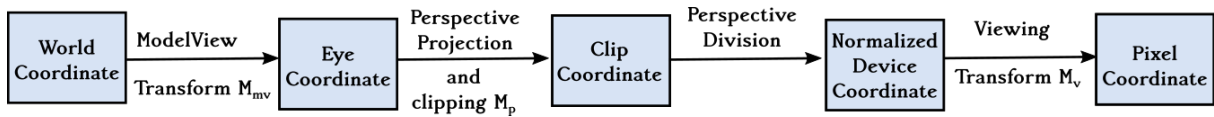


FIGURA 2.7 – PIPELINE DA FORMAÇÃO DA IMAGEM DA CÂMERA VIRTUAL
 FONTE: Adaptado Li (2001)

A matriz de projeção é construída a partir da função *gluPerspective*. A Equação 2.28 apresenta a transformação de projeção perspectiva. As Coordenadas $(X_c, Y_c, Z_c, W_c)^T$ são denominadas *clip coordinate*. Os parâmetros *fovy*, *aspect*, *zFar*, *zNear* são os quatro parâmetros da função *gluPerspective* da OpenGL (WOO et al., 1999).

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ W_c \end{bmatrix} = M_p \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Onde:

$$M_p = \begin{bmatrix} \cotg\left(\frac{fovy/2}{aspect}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cotg(fovy/2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{zFar+zNear}{zFar-zNear} & \frac{2*zFar*zNear}{zFar-zNear} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

A transformação da janela de visualização (*viewport transform*) é expresso pela Equação 2.29. A função *glViewport* é formado pelos parâmetros x_0 , y_0 , *width*, *height* (WOO et al., 1999).

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_v \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ W_c \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Onde:

width: especifica número de colunas em pixels da janela de visualização;

height: especifica número de linhas em pixels da janela de visualização;

zFar: especifica a distância do visualizador ao plano de corte (*clipping*) distante (sempre positivo);

$zNear$: especifica a distância do visualizador para o plano de corte (*clipping*) próximo (sempre positivo);

$fovy$: especifica o ângulo do campo de visão em graus, na direção y ;

x_0 e y_0 : especifica o canto inferior esquerdo do retângulo da janela de visualização, em pixels. O valor inicial é (0,0)

$aspect$: especifica a relação de “aspecto” que determina o campo de visão na direção x . A relação de aspecto é a razão de x (largura) para y (altura).

$$Mv = \begin{bmatrix} \frac{width}{2} & 0 & \frac{width}{2} + x_0 \\ 0 & \frac{height}{2} & \frac{height}{2} + y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A Figura 2.8 ilustra a geometria perspectiva da câmera virtual da OpenGL, mostrando portanto todos os parâmetros envolvidos.

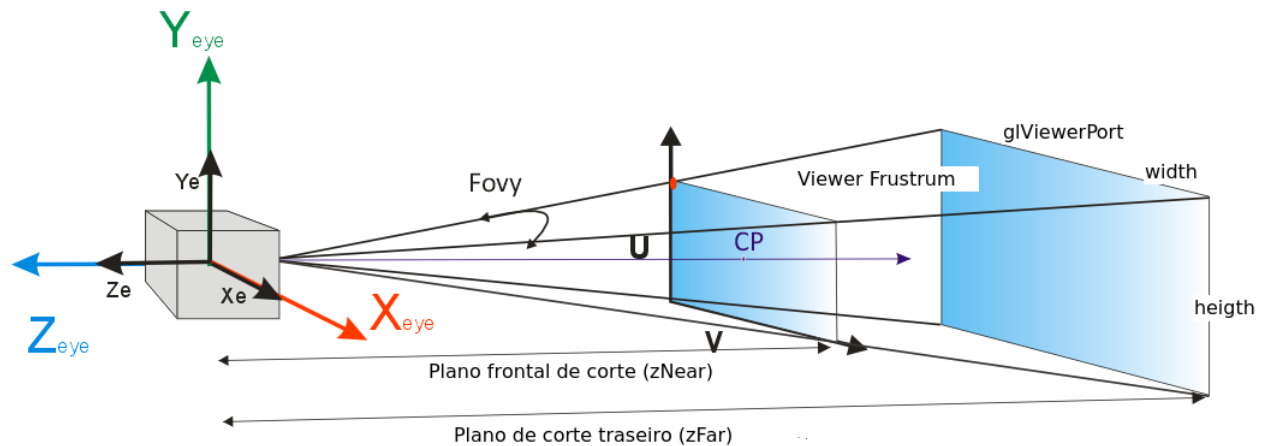


FIGURA 2.8 – GEOMETRIA DA CÂMERA PERSPECTIVA DA OPENGL
 FONTE: Adaptado Woo et al. (1999)

Uma vez que a terceira linha da matriz de projeção M_p é usada para calcular a profundidade e não tem nada haver para a posição com pixels 2D, podemos simplesmente descartá-lo. Assim, obtemos a transformação concatenada a partir da Equação 2.28 e da

Equação 2.29.

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_v M_p \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X_e \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y_e \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.8 CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS POI DO SENSOR ÓPTICO E DA CÂMERA VIRTUAL DA OPENGL

Para que ocorra a compatibilidade espacial entre o cenário do MR e do MV é necessário realizar uma relação entre os POI's do sensor ótico (webcam) obtidos através do processo de calibração com a câmera virtual da OpenGL. Deste modo ambas as câmeras irão compartilhar da mesma geometria. Esta seção abordará a correspondência entre os POI's da câmera usados em visão computacional e da câmera virtual da OpenGL. E adaptação dos POI com as funções de transformação da OpenGL.

Primeiramente comparar as *pipelines* apresentadas nas Figuras 2.4 e 2.7. Obviamente, ambas as câmeras compartilham a mesma primeira tarefa. Mas para a tarefa 2, a projeção perspectiva da visão computacional usa uma distância focal f , enquanto a câmera da OpenGL emprega diferentes distancias focais para direção x e y . Na tarefa 3 a Figura 2.4 é realizado uma transformação de escala, que corresponde a tarefa 4 na Figura 2.7, a transformação de visualização. E o último passo da Figura 2.4 é equivalente ao tarefa 3 em Figura 2.7. São ambos homogeneização de coordenadas.

Agora é o momento de fornecer as relações precisas entre as *pipelines* nas respectivas fórmulas. Para a visão computacional, considerando a distorção descrita na seção 3.2, a equação seguinte pode ser baseado na Equação 2.4.

$$u = \lambda \frac{f}{tp_x} \left(\frac{-X_e}{Z_e} \right) + u_c \quad (2.31)$$

$$v = \lambda \frac{f}{tp_y} \left(\frac{-Y_e}{Z_e} \right) + v_c \quad (2.32)$$

Para câmera virtual OpenGL, também podemos obter coordenadas de pixel a partir da Equação 5:

$$u = \cotg \left(\frac{fovy/2}{aspect} \right) \cdot \frac{-X_e}{Z_e} \cdot \left(\frac{width}{2} \right) + \left(\frac{width}{2} \right) + x_0 \quad (2.33)$$

$$v = \cotg\left(\frac{fovy/2}{aspect}\right) \cdot \frac{-Y_e}{Z_e} \cdot \left(\frac{height}{2}\right) + \left(\frac{height}{2}\right) + y_0 \quad (2.34)$$

Comparando as Equações 2.31 e 2.32 com as Equações 2.33 e 2.34 , pode-se realizar a correspondência entre os parâmetros de transformação utilizados em visão computacional e na OpenGL.

$$\begin{cases} u_c = \frac{width}{2} + x_0 \\ v_c = \frac{height}{2} + y_0 \\ f = \frac{dy}{\lambda} \cotg\left(\frac{fovy}{2}\right) \left(\frac{height}{2}\right) \\ \frac{dx}{dy} = aspect \left(\frac{height}{width}\right) \end{cases} \quad (2.35)$$

Fornecida uma imagem com sua dimensão e os parâmetros da POE e POI da câmera recuperados $t_x, t_y, t_z, \omega, \varphi, \kappa, f, u_c, v_c, dx, dy, k$, as funções OpenGL devem ser chamadas como o seguinte (LI, 2001):

- $glViewport(u_c - width/2, v_c - height/2, width, height);$
- $gluPerspective\left(2 * \text{atan}\left(\frac{height}{\lambda * \frac{f}{dy}}\right) * \frac{\pi}{180}, \frac{width}{height} * \frac{dx}{dy}, zNear, zFar\right)$
- $glTranslatef(t_x, t_y, t_z)$
- $glRotatef(\omega/\pi * 180, 1, 0, 0);$
- $glRotatef(\varphi/\pi * 180, 0, 1, 0);$
- $glRotatef(\kappa/\pi * 180, 0, 0, 1);$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Recursos de hardware

Para o desenvolvimento do sistema de RA para ambientes externos foram utilizados os seguintes hardware:

- Sistema de Medição Inercial: modelo InertiaCube 3 (ver Figura 3.1) da Intersense baseado em tecnologia MEMS, tem como especificação segundo manual do fabricante:
 - 3 Graus de Liberdade (Yaw, Pitch and Roll);
 - máxima Taxa Angular: 1200° por segundo;
 - precisão angular 1° em yaw, 0,25° em pitch e roll;
 - taxa de atualização 180 Hz;
 - dimensões: 26,2 mm x 39,2 mm x 14,8 mm;



FIGURA 3.1 – UNIDADE DE MEDIÇÃO INERCIAL INERTIACUBE 3
FONTE: O Autor (2010)

- *Unidade de navegação GPS-RTK*: as principais especificações do GPS Topcon Hiper Ligth Plus (ver Figura 3.2) , possui a seguinte característica:

- precisão RTK de 10 mm + 1 ppm horizontal, 15mm + 1ppm vertical;
- taxa máxima de leitura 20 Hz;
- comunicação USB;
- dados de saída Formato ASCII protocolo NMEA;



FIGURA 3.2 – GPS RTK TOPCOM HIPER LIGTH PLUS
 FONTE: O Autor (2010)

- *Óculos HMD*: as principais especificações do óculos HMD I-Glasses (ver Figura 3.3) são as seguinte:
 - campo de visão: 26° diagonal;
 - tamanho da imagem virtual: 70”a 13”;
 - profundidade de cor 24 bits de entrada;
 - taxa de atualização 60 Hz NTSC² e 50Hz para PAL;
 - peso: 100g;
- *sensor óptico*: a câmera utilizada para fazer o registro do MR é a Webcam Creative (ver Figura 3.4). As principais característica deste dispositivo são as seguintes:
 - resolução de vídeo 640 x 480 (VGA) com sensor HV7131GP CMOS;
 - $\frac{1}{4}$ polegadas formato óptico;
 - tamanho do pixel 5,6 μ x5,6 μ ;
 - matriz de cor RGB filtro de mosaico;



FIGURA 3.3 – ÓCULOS HMD I-GLASSES
 FONTE: O Autor (2010)



FIGURA 3.4 – SENSOR ÓPTICO WEBCAM CREATIVE COM QUADRO FOCAL DE 640X480
 FONTE: O Autor (2010)

- *Computador Portátil*: o computador utilizado para a geração e visualização da imagem híbrida como também a comunicação com os sensores para a realização da RA em ambientes externos é o Laptop Toshiba Satellite (ver Figura 3.5).A configuração deste laptop são as seguintes:
 - Sistema operacional Windows XP;
 - Memória RAM 0.99 Gb;
 - Processador Celeron de 1.73 GHz;
 - capacidade do disco rígido de 100Gb;

3.1.2 Recursos de Software

Os recursos de software empregados neste trabalho foram os seguintes:

- Ambiente de programação Delphi: Ambiente de programação desenvolvido pela Borland; se utiliza a linguagem de programação orientada a objeto Object Pascal. É uma ferramenta RAD (em inglês, Rapid Application Development);
- API GLSCENE: é uma biblioteca livre baseado em OpenGL para a ambiente de programação Delphi e C++ Builder. Esta biblioteca fornece componentes visuais

²sistema de cores



FIGURA 3.5 – NOTEBOOK TOSHIBA SATELLITE
 FONTE: O Autor (2010)

e objetos que permite a descrição e renderização 3D da cena do MV. A GLScene permite aos programadores criar objetos 3D OpenGL e importar dados em diversos formatos tais como VRML e 3Ds entre outros. Com a GLScene o programador opta em implementar os códigos pela sintaxe GLScene ou pela sintaxe da OpenGL;

- API VideoLAB: é uma biblioteca baseada em OpenCV (em inglês, Computer Vision Library), tem diversas funcionalidades para aquisição de imagens como também para tratamento. Desenvolvido por MITOV softwares. Esta biblioteca tem disponibilizado algumas funções gratuitamente. A principal finalidade desta biblioteca para o trabalho é capturar imagens do MR proveniente da uma câmera de vídeo e convertê-la para um formato digital representado por um mapa de bits (bitmap);
- Camera Calibration Toolbox: Biblioteca utilizada para calibração da Webcam em ambiente de programação Matlab; AutoCAD: utilizado para criação 3D dos objetos virtuais; Aplicativo LerLIDAR: aplicativo desenvolvido pelo autor, este programa tem por finalidade a leitura, tratamento e visualização dos dados LiDAR, desta forma gerando um MDS (Modelo Digital de Superfície).

3.2 MÉTODOS

Nesta seção será apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento de um sistema de realidade aumentada em ambiente externos.

3.2.1 Desenvolvimento do Sistema

O aplicativo desenvolvido em ambiente de programação Delphi 7 foi dividido em três módulos, a saber, conforme apresentado na Figura 3.6.

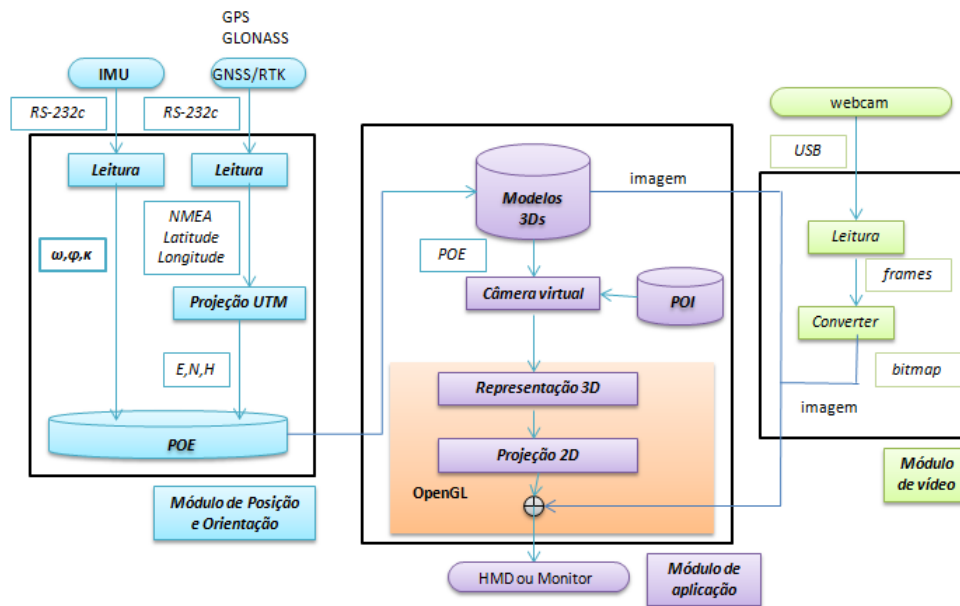


FIGURA 3.6 – DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE RA EM AMBIENTES EXTERNOS

FONTE: O Autor 2010

- **Módulos de Posição e Orientação** este módulo consiste na captura dos dados fornecidos pelos sensores que determinam os parâmetros de orientação exterior do usuário. Os sensores IMU/GNSS estão conectados por meio das portas serial do Laptop. As leituras fornecidas pelo GNSS/RTK é realizada a partir do protocolo NMEA. Para facilitar a manipulação dos dados, estas coordenadas são convertidas UTM (*Universal Transverse Mercator*).
- **Modulo de Vídeo:** através da câmara é realizada a tomada de imagens do mundo real, cada quadro é convertido para o formato bitmap, sendo que o quadro de cada imagem tem a dimensão de 640x480 pixels.
- **Módulo de Aplicação:** Este módulo tem por finalidade gerenciar as informações das maquetes 3D que representam o cenário virtual e realizar a projeção 2D desses objetos no display em harmonia com o cenário do mundo real capturada pela câmera. Para isso, foram utilizadas as matrizes de modelagem e projeção da biblioteca gráfica OpenGL.

3.2.2 Gerenciamento das Informações 3D

O gerenciamento das informações 3D consiste no armazenamento das informações espaciais da maquete virtual em um banco de dados. Neste trabalho foram elaborados

modelos 3D de edificações em CAD. Cada camada da estrutura das edificações foi convertida para o formato 3DS. Este formato de arquivo, permite armazenar informações sobre objetos 3D, tais como forma, propriedades de material, fontes de luz, etc. Foram construídas duas maquetes, uma representando uma edificação simples e outra representando uma edificação de vários andares (ver Fig. 3.7).

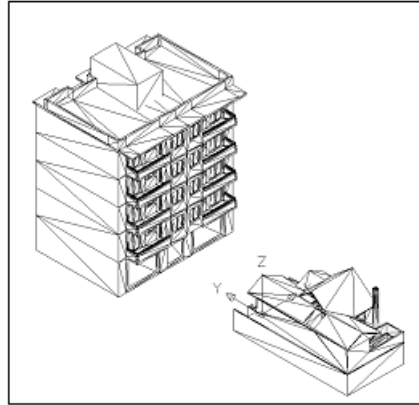


FIGURA 3.7 – Modelos Virtuais desenvolvidas em CAD

3.2.3 Projeção 2D

Para compatibilizar os sistemas referenciais dos diferentes equipamentos envolvidos é necessário aplicar transformações matemáticas que descrevessem suas relações geométricas. A Figura 3.8 mostra os sistemas referenciais e as transformações que devem ser consideradas para a integração destes dados derivados dos sensores dispostos no sistema de RA. O modelo funcional para sobreposição dos objetos do mundo virtual com o mundo real pode ser descrito utilizando transformações espaciais conforme a Equação 3.1.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = U * P * W * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Onde X, Y e Z as coordenadas dos vértices dos objetos virtuais, u e v as coordenadas no sistema de pixels. Na Equação . 3.2 é apresentado a transformação afim entre o sistema imagem e o sistema pixel que consiste em:

$$U = \begin{bmatrix} S_x & \tau & u_0 \\ 0 & S_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

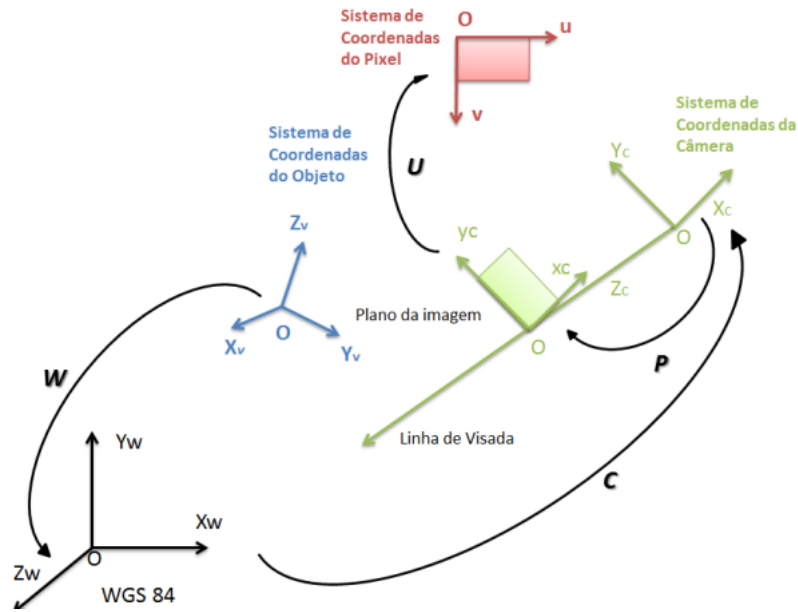


FIGURA 3.8 – Sistemas de Coordenadas Envolvidos

Onde os parâmetros S_x e S_y são fatores de escala referentes a transformação entre os sistemas, enquanto τ é o parâmetro de não similaridade, e os parâmetros u_0 e v_0 se referem ao deslocamento do ponto principal em pixel, sendo estes determinados a partir da calibração da webcam.

A próxima transformação se refere à projeção perspectiva entre o sistema de coordenadas da câmera com o sistema de coordenada da imagem, representado por meio da Equação 3.3 e representado pela matriz:

$$P = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O parâmetro f é a distancia focal definido a partir da calibração da webcam. A transformação representada pela matriz W corresponde à transformação de mudança de referencial, ou seja, entre as coordenadas de referência global com o sistema de coordenadas da webcam conforme apresentado na Equação 3.4

$$W = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Onde r_{ij} são os elementos da matriz de rotação, dado em função dos ângulos eulerianos

(ω, ϖ, κ) , definido por:

t_x, t_y, t_z : são os valores de translação do observador fornecidas pelo rover do GPS/RTK e convertidas para coordenadas cartesianas UTM.

Para a construção da realidade aumentada a imagem capturada pela webcam é projetada como pano de fundo do *display*, e a sobreposição dos objetos virtuais é efetuado a partir das matriz de modelagem e da matriz de projeção da OpenGL. As matrizes de modelagem recebem os parâmetros de OE fornecidos pelos sensores IMU e GPS/RTK, enquanto a matriz de projeção recebe os parâmetros de OI da webcam para que a geometria dos objetos virtuais estejam compatíveis com o cenário do mundo real.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

4.1 RESULTADO DA CALIBRAÇÃO E DA CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS POI'S DA WEBCAM E DA CAMERA VIRTUAL DA OPENGL

Nesta seção será apresentado os resultados atingidos para a correspondência dos POI's da webcam com os parâmetros intrínsecos da câmera virtual da OpenGL. Primeiramente, foram determinados os POI's da webcam. Para isso foi utilizado o método apresentado por Zhang (2000), conforme explicado na seção 2.6. Para uma maior agilidade neste procedimento foi utilizado a biblioteca *Calib Tools* desenvolvido por Bouguet (2004) para ambiente Matlab. Foi coletado um total de 20 imagens do padrão coplanar (ver Figura 4.1) com diferentes posições e orientações da webcam.

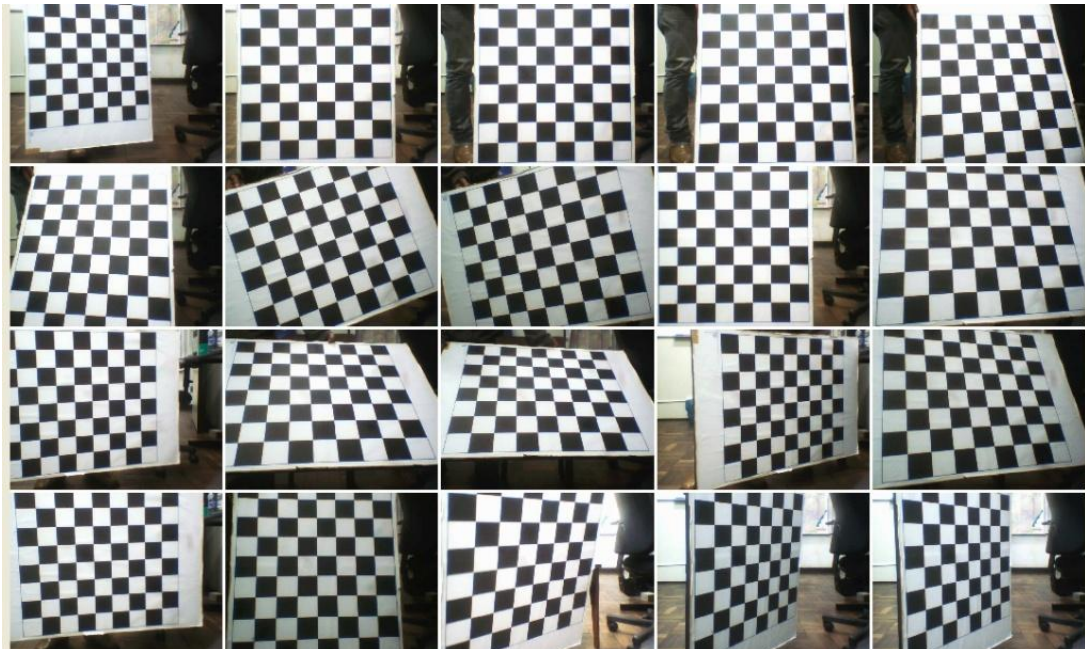


FIGURA 4.1 – IMAGENS UTILIZADAS PARA CALIBRAÇÃO
FONTE:O Autor 2011

O algoritmo do *Calib-Tools* consegue detectar através de correlação de imagens as coordenadas 3D e seu correspondente fotogramétrico de cada vértice dos quadrados do padrão coplanar. Por meio das equações apresentadas na seção 2.6 é aplicado o MMQ

para a determinação dos POI's da webcam, como também os POE da webcam para cada uma das 20 imagens. A Tabela 4.1 apresenta os POI's da webcam e seus respectivos desvios-padrões.

TABELA 4.1 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DA WEBCAM CALIBRADOS

$f_x(mm)$	$f_y(mm)$	$u_0(mm)$	$v_0(mm)$	$k_1(mm)^{-2}$	$k_2(mm)^{-4}$
4,166	4,170	1,684	1,079	$1,718 \times 10^{-3}$	$-0,0308 \times 10^{-3}$
Desvios-padrão					
$\pm 0,015$	$\pm 0,140$	$\pm 0,0144$	$\pm 0,015$	$\pm 8,0 \times 10^{-8}$	$\pm 4,2 \times 10^{-8}$

FONTE: O Autor (2010)

Os parâmetros apresentados na Tabela 4.1, foram convertidos para valores métricos, logo que o aplicativo *Calib-Tools* retorna o valores destes parâmetros em valores de pixels. Esta conversão é realizado pela multiplicação do valor do parâmetro com tamanho físico do pixel (tp) do sensor CCD da webcam. Segundo o manual de fabricante da webcam Genius o tamanho do pixel é de $5,6\mu$ (micras) , ou seja, $0,0056mm$. Nota-se também na tabela supracitada que os valores das distorção radial descentrada (p) foram negligenciadas por questões de praticidade. A Figura 4.2 apresenta o gráfico da distorção descentrada da webcam.

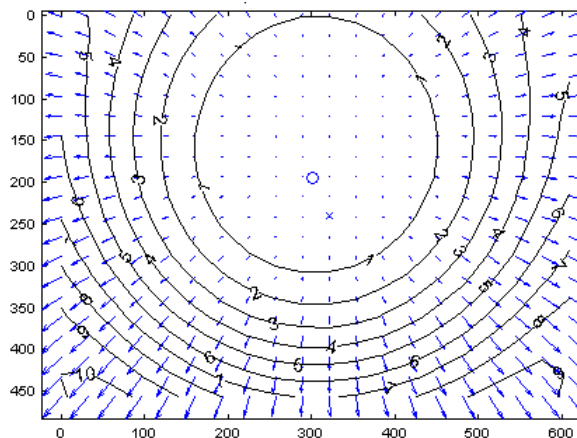


FIGURA 4.2 – GRÁFICO DE DISTORÇÕES RADIAIS DAS LENTES DA WEBCAM CREATIVE

FONTE:O Autor (2010)

Analisando o gráfico apresentado na figura, em se tratando de um sensor ótico de baixo custo, notas-e um valor acentuado do deslocamento do ponto principal (u_0, v_0). Considerando a dimensão do quadro focal de 360×480 pixels, temos um deslocamento do ponto principal em u_0 de aproximadamente 21 pixels ($\frac{640}{2} - 301$) e para v_0 de apro-

ximadamente 47 pixels ($\frac{480}{2} - 193$). Para a amenização deste problema o processo de retificação (correção) se faz necessário. Como o processamento de um sistema de RA equivale a 15 quadros por segundo, o processo de retificação de cada imagem, torna-se o custo computacional bastante elevado. Uma forma de contornar este problema é inserir o deslocamento do ponto principal na câmera virtual da OpenGL conforme apresentado na seção 2.8.

Para verificar, visualmente, a correspondência os POI da webcam com a câmera virtual da OpenGL foi criado um arranjo de esferas com 10mm de raio. As coordenadas tridimensionais de cada vértice do centro da esfera, tem as mesmas coordenadas tridimensionais dos vértices do tabuleiro. Neste caso, um arranjo de sete colunas e oito linhas, totalizando 56 esferas. Cada espaçamento dos quadrados do tabuleiro é de 78,92mm \times 78,72. Foi selecionado uma das 20 imagens para teste, a Tabela 4.2 apresenta o POE da webcam da respectiva imagem selecionada para o teste.

TABELA 4.2 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DA WEBCAM NA IMAGEM DE TESTE

X_0 (mm)	Y_0 (mm)	Z_0 (mm)	ω ($^\circ$)	φ ($^\circ$)	$kappa$ ($^\circ$)
270,82	304,52	1062,208	0,32	3,63	-1,42

FONTE: O Autor (2010)

Para projetar as esferas representando o MV sobre a imagem teste que representa o cenário do MR, foi empregado a Equação 2.30, conforme apresentado na seção 2.7

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_v M_p \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X_0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y_0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

As coordenadas (u, v) da equação acima são as coordenadas do centro da esfera no espaço imagem, as coordenadas (X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas 3D da webcam na tomada da fotografia e as coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) são as coordenadas do centro da esfera no espaço objeto. para uma melhor acomodação das coordenadas (u, v) do centro das esferas com as coordenadas (u, v) da imagem teste são aplicadas o conjunto de equações 2.35 conforme apresentado na seção 2.8. A Figura 4.3 mostra o resultado da sobreposição entre as esferas (projetadas pela câmera virtual da OpenGL) e a imagem teste do tabuleiro (webcam).

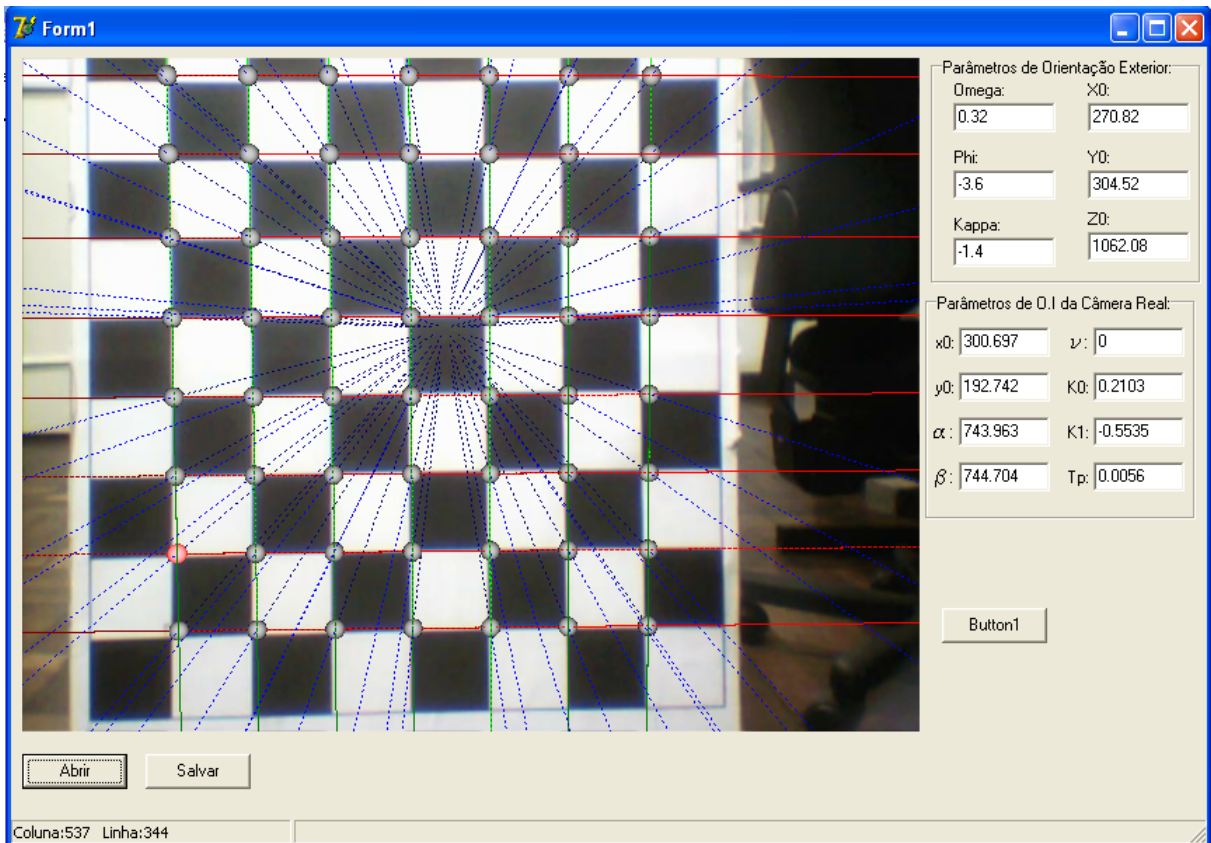


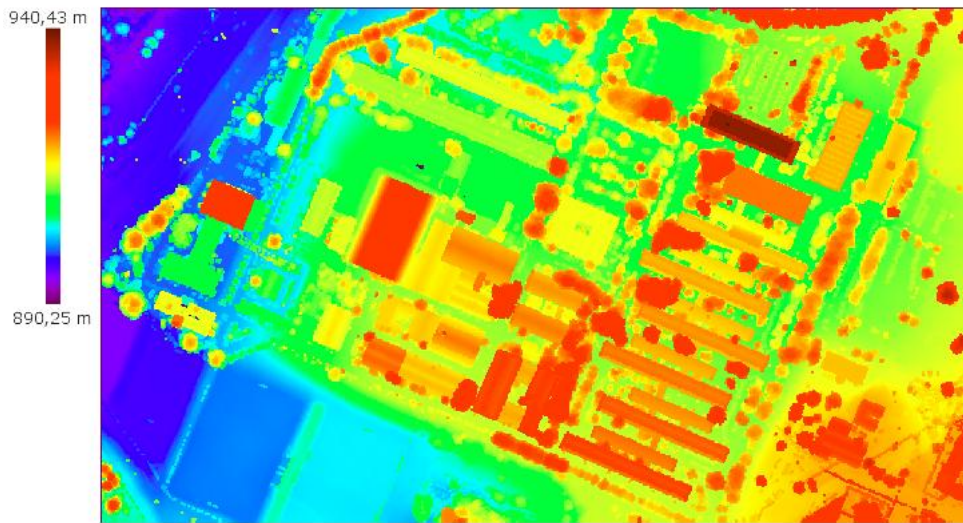
FIGURA 4.3 – GEOMETRIA DA CÂMERA PERSPECTIVA DA OPENGL
 FONTE: O Autor (2010).

Conforme apresentado na Figura 4.3 ao plotar as esferas no tabuleiro da imagem teste, são verificadas as coordenadas de um pixel do vértice do tabuleiro com o centro da esfera. Através deste procedimento se pode averiguar, visualmente, o erro em pixel que ocorre com as transformações de coordenadas com os objetos virtuais (esferas) em relação às coordenadas em pixel correspondentes aos vértices do tabuleiro. Este erro pode ser contornado inserindo o parâmetro de distorção radial da webcam na matriz *gluProjection* da OpenGL. Esta solução será implementada em trabalhos futuros.

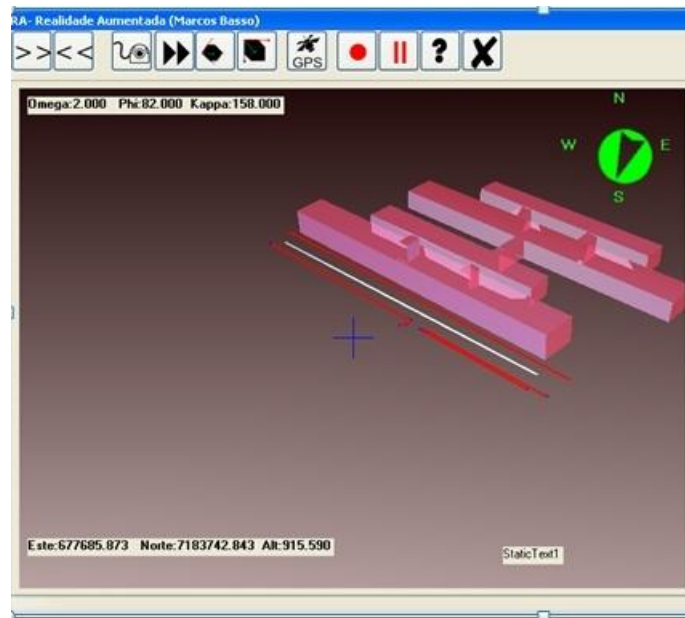
4.2 EXPERIMENTO 1: VISUALIZAÇÃO DOS DUTOS VIRTUAIS

Neste experimento foi simulada uma tubulação virtual passando sob o eixo da rua localizado no Centro Politécnico Jardim das Américas, em Curitiba. Para isso, foram elaborados modelos tridimensionais reconstruídos a partir dos dados de altimetria fornecidos pelo LIDAR da área em estudo (ver Figura 4.4).

Neste experimento, o capacete contendo a câmara e a unidade de medição inercial foram posicionados em um tripé, localizado num ponto com coordenadas conhecidas.



(a)



(b)

FIGURA 4.4 – A) IMAGEM DE ALTIMETRIA POR MEIO DO LIDAR DA ÁREA DE ESTUDO; B) IMPORTAÇÃO DOS OBJETOS EM FORMATO DE ARQUIVOS 3DS PARA O SISTEMA;
 FONTE: O Autor (2011)

Como o tripé permite a variação dos ângulos horizontal e vertical, foi possível simular movimentos da cabeça do usuário. A visualização da imagem híbrida resultante é vista diretamente na tela do laptop.

Inicialmente, o sistema deve ser alimentado com os parâmetros iniciais de posição e orientação inicial, para localizar a posição do observador e sua atitude inicial. A orientação inicial pode ser obtida com ajuda de uma bússola. Realizado o procedimento

de inicialização, o sensor inercial é ativado com seus ângulos zerados. |

A partir do instante que a câmera virtual esta previamente orientada, cada nova-leitura do IMU incrementará novos valores para a orientação da câmera virtual. A taxa de leitura do IMU é de 10 Hz, com mesma taxa de atualização dos quadros do vídeo.

A Figura 6 mostra uma série de quadros com a tubulação virtual e os vetores que representam os eixos da via. Pode ser verificado neste teste que a correspondência espacial entre a imagem real e os dados virtuais é correta, visto que a escala entre os objetos reais e virtuais é coerente, desta forma estabelecendo uma mesma perspectiva.



FIGURA 4.5 – FREQUÊNCIA DE QUADROS COM A TUBULAÇÃO VIRTUAL
FONTE:O Autor (2010)

Foi verificado que com o passar do tempo ocorre instabilidade posicional da imagem virtual, principalmente causada pela alta variação da medição do ângulo κ . A unidade de medição inercial apresenta alta instabilidade, principalmente em κ , o que resulta na rotação relativa da imagem virtual em relação à imagem real. Isto implica em erros na aplicação em tempo real. Um detalhe deste erro é ilustrado na Figura 4.6.

Inicialmente a câmera e o sistema inercial foram apontados para o centro da rua. Num primeiro momento, a câmera, junto com o sistema inercial acoplado, foi girada para o lado esquerdo Figura 4.6 (a). Neste primeiro movimento a câmera virtual acompanha a rotação da cena de maneira correta, do que resulta uma boa concordância espacial. A seguir, o sistema foi girado para a direita, voltando à posição inicial (Figura 4.6 (b)). O resultado não é, neste caso, correto. A precisão das medições angulares é baixa e gera erros que se acumulam. Devido à acumulação de erros é verificada a rotação relativa dos



FIGURA 4.6 – (A) DESLOCAMENTO PARA ESQUERDA; (B) RETORNO
 FONTE:O Autor (2011)

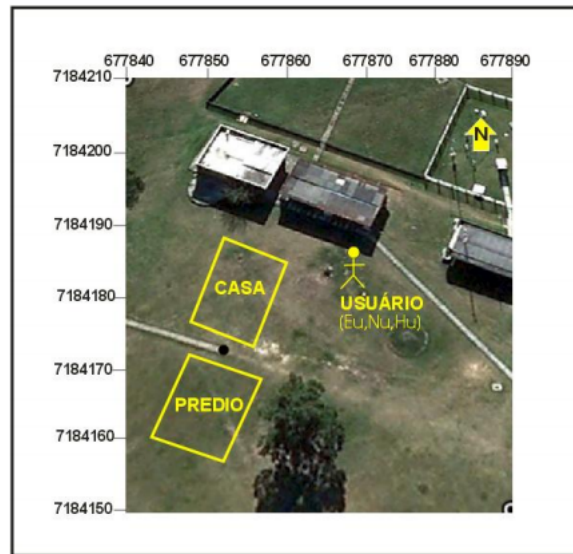
dois sistemas. Isto pode ser observado na linha vermelha que identificaria a calçada da rua. O extremo direito desta linha aparece claramente no meio da rua, evidenciando os erros angulares.

O problema de falta de precisão da medição angular é uma limitação decorrente do uso de sensores inerciais de baixo custo. Os sensores baseados em tecnologia MENS são de baixo custo e de baixa precisão. A baixa precisão é caracterizada por um forte bias que modifica as medições angulares. Porém, eles tem-se tornado populares em diferentes aplicações, principalmente pelo baixo custo,.

Os erros presentes em suas medições apresentam componentes determinísticos que precisam ser estimados e compensados, e componentes aleatórios que precisam ser modelados e filtrados, temas que podem ser objeto de estudos futuros.

4.3 EXPERIMENTO 2: VISUALIZAÇÃO DA MAQUETE VIRTUAL

Este experimento tem por finalidade aplicar o sistema de RA na visualização de maquetes desenvolvidas em CAD, na escala 1:1, em tempo real, ao ar-livre para testar seu desempenho, o lugar escolhido para realizar os testes, foi uma ampla área externa nas dependências do Centro Politécnico da UFPR, próximo ao laboratório LAGEH (Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia). A Figura 4.7 (a) apresenta um croqui do local onde será alocados as maquetes virtuais, representando as construções georreferenciados no sistema WGS-84 (World Geodetic System-1984), armazenados em disco no formato de arquivo 3Ds.



(a)



(b)

FIGURA 4.7 – A) LOCALIZAÇÃO DOS TESTES NO CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR, B) USUÁRIO COM DISPOSITIVOS DO SISTEMA RA; B) USUÁRIO EQUIPADO COM DISPOSITIVOS DE RA; C) RESULTADO DA IMAGEM HÍBRIDA
 FONTE: O Autor (2011)

A Figura 4.7 (b) mostra os equipamentos montados sobre o corpo do usuário, nota-se a antena rover do GPS/RTK sob as costas, engatado dentro de uma mochila, o capacete contendo a webcam e o IMU, como também o laptop para realização do processamento dos dados.

Quando o sistema é acionado, os três módulos que compõem o sistema de RA funcionam de forma cadenciada, os sensores IMU e a webcam foram configurados para fazer a atualização em tempo real a uma taxa de 20 quadros por segundo. Os magnetômetros do IMU, quando acionados, estão referenciados ao norte magnético, sendo assim,

necessário conhecer a declinação magnética para converter ao norte geográfico.

Como este sistema de RA foi baseado em vídeo, sendo assim permitindo a gravação das imagens no formato *.mpeg* para posterior documentação. A Figura 4.8 mostra o resultado dos objetos virtuais sendo projetados sobre o cenário do mundo real, a partir do módulo vídeo. Nota-se os detalhes da textura da maquete. Conforme o usuário se desloca vai recebendo dados do GPS/RTK, a partir do rover, estes dados são atualizados a 1Hz. Outra vantagem da RA baseado em vídeo, e que futuramente será implementado algoritmos baseados em visão computacional para correção do IMU baseado em características visuais da imagem. No qual não seria possível em outros sistemas de visualização como em óculos HUB.

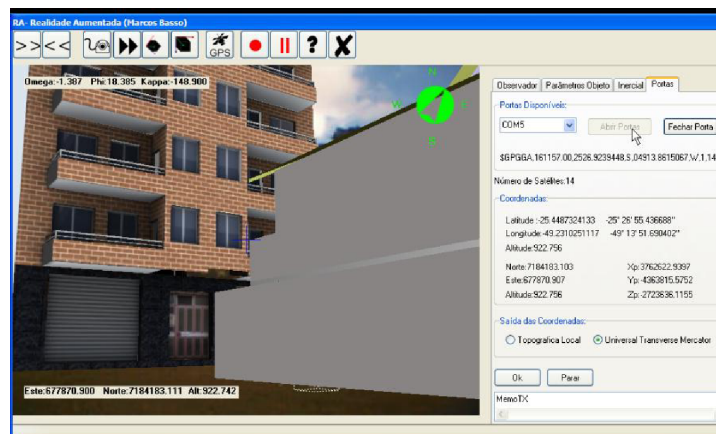


FIGURA 4.8 – Programa Ativado contendo informações do observador

Na Figura 4.9 são apresentadas as imagens obtidas de diferentes posições com diferentes orientações do observador. Conforme o observador se movimentava a cabeça, novos valores de ângulos são medidos e lidos pelo aplicativo. Os parâmetros de rotação e translação alimentam os dados para a matriz W denominada de *ModelViewer* da biblioteca OpenGL, que equivale a matriz apresentada na Equação 3.4 e se encarrega de realizar as transformações geométricas, conforme apresentadas na Equação 3.1.

Conforme esperado, o sistema apresentou algumas limitações devido às características dos sensores empregados, principalmente no que se refere à IMU, que apresenta baixa precisão no ângulo kappa (κ). Tal deficiência pode ser solucionada adicionando-se injunções, como por exemplo, o uso de pelo menos dois alvos fixos no mundo real com coordenadas conhecidas. Através da recessão espacial pode ser efetuada a correção dos ângulos e também da posição do observador. O GPS/RTK apesar de fornecer uma relativa precisão, a taxa de atualização de apenas 1Hz enquanto a webcam e captura cada quadro a uma taxa de 20 Hz prejudicando de certa forma a sinergia entre o registro da

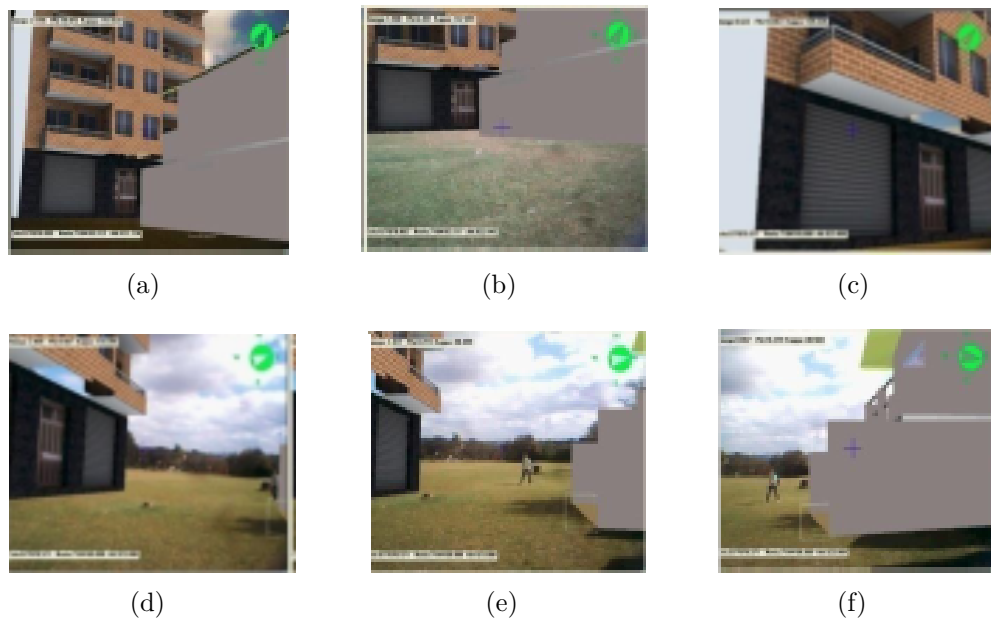


FIGURA 4.9 – a) Visão inicial do usuário; b) visão do observador quando se desloca para frente; c) novo ponto de vista do usuário girando a cabeça para direita; d) com o observador se deslocando novamente para frente, mas em outra direção; e) observador girando a cabeça para direita. E (f) nota-se a dimensão das maquetes virtuais em relação aos transeuntes caminhando pelo campus.

maquete virtual em relação ao mundo real. O óculos HMD, além de permitir ao usuário estar em ambiente imersivo, apresenta outra vantagem que, indiferente da luminosidade do ambiente externo, não atrapalhou a visibilidade, ao contrário de outros sistemas de RA baseados em monitor. Mas o HMD provoca uma certa insegurança ao usuário conforme ele caminha pelo cenário.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de um protótipo de RA móvel em ambientes externos para a visualização de modelos tridimensionais virtuais com a cena do mundo real. O protótipo proposto permite a obtenção da posição e rotação do sensor de imageamento em tempo real e determinados diretamente pelos sensores GPS de alta precisão e IMU de baixo custo, respectivamente, possibilitando a orientação e posicionamento do usuário em uma RA totalmente imersiva. Foram implementados programas em Delphi, para todas as etapas do processo e realizado a calibração da câmera Webcam. O processo é totalmente interativo (usuário/sistema) de forma amigável e eficiente.

O procedimento proposto foi testado em situações reais e foram apresentados dois casos, um para visualização de tubulações e o outro para estudos de maquetes 3D virtuais. Os resultados obtidos foram analisados e permitiram uma avaliação parcial do sistema, bem como da precisão do dispositivo de navegação inercial usado e a qualidade geométrica da Webcam, assim como das situações potencialmente problemáticas. Considerando o protótipo desenvolvido, verificou-se suas adequações aos casos testados e apesar dos problemas encontrados na geração da imagem híbrida a aplicação deste trabalho reflete o potencial da utilização da RA na cartografia.

Outra vantagem está relacionada com os processos de calibração dos dispositivos de baixo custo tal como a Webcam, que exigem modelos simplificados e menor esforço operacional, para atender as precisões exigidas. Mas apesar de problemas apresentados no registro do MV com o MR, o sistema mostrou-se robusto e de fácil operabilidade. A biblioteca GLScene baseado em OpenGL mostrou-se eficiente e robusta no processamento dos dados em tempo real não mostrando atrasos na formação da imagem híbrida.

Como a tecnologia de visualização foi baseado em monitor e HMD, o registro do MR foi feito a partir de câmera de vídeo, desta forma, ocorre um atraso em fração de segundos desde o registro da imagem até a sua visualização no display. Durante os ex-

perimentos ocorreu um fenômeno indesejável denominado "Gimbal Lock", este fenômeno ocorre quando dois ou três eixos de rotação estão alinhados, uma das rotações não tem qualquer efeito, acarretando perda de graus de liberdade ao se executar determinadas combinações de rotações. Uma forma de amenizar este problema é representar a leitura dos ângulos eulerianos na forma de quartenios. No qual será estudado e implementado nas novas versões do protótipo.

Futuramente este protótipo desenvolvido poderá ser utilizado em diferentes aplicações de RA para ambientes externos tais como: na reconstrução de ambientes históricos a partir de métodos fotogramétricos; utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) integrado a um banco de dados para a visualização e análise de dados em tempo real.

5.2 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Como recomendações para continuidade desta pesquisa destacam-se:

- uso de algoritmos de predição para integrar efetivamente os sensores GPS/IMU, melhorando a orientação do usuário, ou usar MEMS mais modernos com 6DoF;
- calibrar o sistema através de uma técnica conhecida como *boresight misalignment*, que corresponde à determinação rígida da origem de cada sistema envolvido no protótipo;
- Utilizar IMU de melhor precisão e com baterias que não dependem de fios elétricos proporcionando maior flexibilidade ao usuário.
- Utilizar métodos de ajustamento por mínimos quadrados para a diminuição dos ruídos existentes no IMU.

Referências Bibliográficas

- ALVES, D. **Posicionamento GPS Utilizando o Conceito de Estação Virtual. 2008. 165f.** Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas)— Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.
- AZUMA, R. Tracking requirements for augmented reality. **Communications of the ACM**, ACM, v. 36, n. 7, p. 50–51, 1993.
- AZUMA, R. et al. Recent advances in augmented reality. **Computer Graphics and Applications, IEEE**, IEEE, v. 21, n. 6, p. 34–47, 2001.
- AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators and virtual environments**, MIT Press, v. 6, n. 4, p. 355–385, 1997.
- BEHZADAN, A. H.; KAMAT, V. R. Visualization of construction graphics in outdoor augmented reality. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. **Proceedings of the 37th conference on Winter simulation.** [S.l.], 2005. p. 1914–1920.
- BOBRICH, J.; OTTO, S. Augmented maps. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Citeseer, v. 34, n. 4, p. 502–505, 2002.
- BOUGUET, J.-Y. Camera calibration toolbox for matlab. 2004.
- BROWN, L. G. A survey of image registration techniques. **ACM computing surveys (CSUR)**, ACM, v. 24, n. 4, p. 325–376, 1992.
- COELHO, A. H. **Erweiterte Realität zur Visualisierung simulierter Hochwasserereignisse.** Tese (Doutorado), 2004.
- DAI, L. et al. Predicting atmospheric biases for real-time ambiguity resolution in gps/glonass reference station networks. **Journal of Geodesy**, Springer, v. 76, n. 11-12, p. 617–628, 2003.
- EISENHART, C. Realistic evaluation of the precision and accuracy of instrument calibration systems. **J. Res. Natl. Bur. Stand.(US) C**, v. 67, p. 161–187, 1963.
- FEINER, S. et al. Windows on the world: 2d windows for 3d augmented reality. In: ACM. **Proceedings of the 6th annual ACM symposium on User interface software and technology.** [S.l.], 1993. p. 145–155.
- FEINER, S. et al. A touring machine: Prototyping 3d mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. **Personal Technologies**, Springer, v. 1, n. 4, p. 208–217, 1997.
- FREITAS, S. R. C. d.; GEMAEL, C. Posicionadores inerciais. 1980.

GOLUB, G. H.; LOAN, C. F. V. Matrix computations. 1996. **Johns Hopkins University, Press, Baltimore, MD, USA**, p. 374–426, 1996.

GREEN, S. A. et al. Human-robot collaboration: A literature review and augmented reality approach in design. **International journal of advanced robotic systems**, SAGE Publications, v. 5, n. 1, p. 1, 2008.

HARINGER, M.; REGENBRECHT, H. T. A pragmatic approach to augmented reality authoring. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. **Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality**. [S.l.], 2002. p. 237.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple view geometry in computer vision**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003.

KING, G. R.; PIEKARSKI, W.; THOMAS, B. H. Arvino-outdoor augmented reality visualisation of viticulture gis data. In: IEEE. **Mixed and Augmented Reality, 2005. Proceedings. Fourth IEEE and ACM International Symposium on**. [S.l.], 2005. p. 52–55.

LEDERMANN, F.; SCHMALSTIEG, D. April: A high-level framework for creating augmented reality presentations. In: IEEE. **Virtual Reality, 2005. Proceedings. VR 2005. IEEE**. [S.l.], 2005. p. 187–194.

LI, M. Correspondence analysis between the image formation pipelines of graphics and vision. In: PUBLICATIONS DE LA UNIVERSITAT JAUME I. **Untitled Event**. [S.l.], 2001. p. 187–192.

LIMA, Á. J. R. de; CUNHA, G. G.; HAGUENAUER, C. J. Realidade aumentada no ensino de geometria descritiva. **Virtual Reality and Scientific Visualization Journal**, v. 1, n. 2, p. 28–41, 2008.

MACINTYRE, B.; COELHO, E. M.; JULIER, S. J. Estimating and adapting to registration errors in augmented reality systems. In: IEEE. **Virtual Reality, 2002. Proceedings. IEEE**. [S.l.], 2002. p. 73–80.

MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. **IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems**, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 77, n. 12, p. 1321–1329, 1994.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. [S.l.]: Editora UNESP, 2007.

PORTALÉS, C.; LERMA, J. L.; NAVARRO, S. Augmented reality and photogrammetry: A synergy to visualize physical and virtual city environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 134–142, 2010.

REITMAYR, G.; SCHMALSTIEG, D. **Collaborative augmented reality for outdoor navigation and information browsing**. [S.l.]: na, 2004.

ROMÃO, T. et al. Ants?augmented environments. **Computers & Graphics**, Elsevier, v. 28, n. 5, p. 625–633, 2004.

- SANTANA, D. et al. Estimaco de trajetrias utilizando sistema de navegao inercial strapdown. In: SN. **XV Congresso Brasileiro de Automtica**. [S.l.], 2004.
- SCHMALSTIEG, D. et al. Managing complex augmented reality models. **IEEE Computer Graphics and Applications**, IEEE, v. 27, n. 4, 2007.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. [S.l.]: Walter de Gruyter, 2003.
- SIELHORST, T. et al. An augmented reality delivery simulator for medical training. In: **International Workshop on Augmented Environments for Medical Imaging-MICCAI Satellite Workshop**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 141, p. 11–20.
- SUTHERLAND, I. E. A head-mounted three dimensional display. In: ACM. **Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I**. [S.l.], 1968. p. 757–764.
- THOMAS, B. et al. Arquake: An outdoor/indoor augmented reality first person application. In: IEEE. **Wearable computers, the fourth international symposium on**. [S.l.], 2000. p. 139–146.
- TITTERTON, D.; WESTON, J. L. **Strapdown inertial navigation technology**. [S.l.]: IET, 2004.
- VALLINO, J. R. **Interactive augmented reality**. Tese (Doutorado) — University of Rochester, 1998.
- VLAHAKIS, V. et al. Archeoguide: an augmented reality guide for archaeological sites. **IEEE Computer Graphics and Applications**, IEEE, v. 22, n. 5, p. 52–60, 2002.
- WELCH, G.; FOXLIN, E. Motion tracking: No silver bullet, but a respectable arsenal. **IEEE Computer graphics and Applications**, IEEE, v. 22, n. 6, p. 24–38, 2002.
- WOO, M. et al. **OpenGL programming guide: the official guide to learning OpenGL, version 1.2**. [S.l.]: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1999.
- ZHANG, Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: IEEE. **Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on**. [S.l.], 1999. v. 1, p. 666–673.
- ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 22, n. 11, p. 1330–1334, 2000.