

MAPEAMENTO DE RUAS COM UM SISTEMA MÓVEL DE MAPEAMENTO DIGITAL

João Fernando Custódio da Silva¹

Paulo de Oliveira Camargo²

Marcos Crestana Guardia³

Mário Luiz Lopes Reiss³

Rodrigo Alexandre da Costa Silva³

Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis³

Ronaldo Aparecido de Oliveira⁴

Universidade Estadual Paulista – Unesp

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Cartografia

19060-900 Presidente Prudente SP Brasil

¹jfcsilva@prudente.unesp.br; ²paulo@prudente.unesp.br

<http://www.prudente.unesp.br/dcartog/dcartog.htm>

³Curso de Engenharia Cartográfica

⁴Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas

RESUMO

Os sistemas móveis de mapeamento integram sensores e metodologia de modo a produzir uma posição espacial de qualquer detalhe na ou próximo à superfície terrestre. Isto significa um conjunto de equipamentos, consideravelmente caros, tais como câmaras digitais, receptores GPS (*Global Positioning System*), plataformas inerciais, entre outros, de tal modo que quando juntos podem produzir imagens georreferenciadas e coordenadas espaciais de qualquer atributo. Uma seqüência de imagens terrestres foi formada por imagens digitais consecutivas tomadas de bases que foram movidas ao longo do eixo principal de ruas. Este procedimento foi feito depois de montadas as vídeo câmaras no topo de um veículo Kombi para tomar as imagens dos arruamentos. A orientação do sensor foi obtida por meio da integração GPS (posicionamento dos centros perspectivos) e fototriangulação (atitude das câmaras). Este artigo apresenta os conceitos e problemas dos sistemas relacionados à tecnologia de mapeamento móvel e apresenta os primeiros resultados produzidos por um protótipo em desenvolvimento num projeto de mapeamento de ruas na escala 1:2000. Testes estatísticos mostraram que a acurácia do mapa foi aceitável e o erro padrão ficou em torno de 1,0 mm na escala do mapa.

Palavras-chaves: Sistema Móvel de Mapeamento; Seqüência de Imagens; Mapeamento de Ruas.

ABSTRACT

Mobile mapping systems integrate sensors and methods to deliver an accurate spatial position of details on or near the topographic surface. This means an expensive hardware configuration where digital cameras, GPS (*Global Positioning System*) receivers, Inertial Navigation System platforms, wheel sensors, gyroscopes, laser rangefinders and others are linked together to produce georeferenced images and spatial coordinates of attributes. A sequence of terrestrial images is formed by consecutive digital images taken from bases that are moved forward along the main axis of a road. This happened after a pair of video cameras was mounted on the top of a vehicle to take frontal images of a street. Sensor orientation was provided directly by means of the GPS (positioning of the perspective centers) and phototriangulation (attitude). This article presents the concept and the major issues related to the mobile mapping technology. It also presents and discusses the first results produced by the application of a moving prototype, currently under development, in a 1:2000 street map project. Statistic tests show that the map accuracy succeeded and the standard error is 1.0 mm in map scale.

Key words: Mobile Mapping Systems, Image Sequence, Road Mapping.

1. INTRODUÇÃO

A população urbana mundial cresceu dramaticamente desde a Revolução Industrial e mais ainda após a Segunda Guerra Mundial. Este crescimento, em alguns casos, menos acelerado, deve continuar tanto em países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento, seja por migração ou por aumento natural da população nativa, respectivamente. Os administradores das metrópoles ou de pequenas cidades precisam estar preparados para responder aos desafios que advêm do crescimento populacional urbano. Dentre as muitas respostas, faz-se necessário criar novos bairros e ruas. É necessário também manter as ruas existentes em boas condições para milhões de pessoas que delas fazem uso diário.

Ao longo dos arruamentos, as companhias de serviço de utilidade pública lançam suas redes de água e esgoto, energia elétrica, telecomunicações, e muitas outras. Postes e árvores são comuns nas cenas urbanas. Se por um lado eles estão lá para ajudar, por outro lado eles também atrapalham as pessoas quando caminham nas calçadas. Pedestres e motoristas, estes conduzindo diferentes tipos de veículos, precisam de uma linguagem clara e segura para comunicarem-se mutuamente em benefício da segurança. Esta linguagem é expressa na forma de sinais e avisos, horizontais e verticais. A segurança no trânsito depende também das condições do pavimento. Não são apenas os arquitetos e os urbanistas que se empenham por um ambiente urbano confortável onde se possa viver com dignidade, segurança e felicidade. Uma longa lista de palavras agradáveis poderia ser continuada para justificar a necessidade de mapear os arruamentos urbanos. Em suma, de um ponto de vista técnico, um acervo de imagens e mapas digitais ajudará os administradores e engenheiros a melhorar os padrões de qualidade de vida nas cidades. Particularmente, os sistemas móveis de mapeamento (SMM) desempenham um papel importante na coleta de dados para mapear ruas e alimentar os sistemas de informações geográficas (SIG) (Li & Murai, 1999).

Em geral, as cidades são fisicamente conectadas por uma rede de caminhos composta de rodovias, ferrovias e hidrovias. Tanto uma rede de estradas quanto um arruamento em particular exige manutenção permanente para transportar pessoas e bens em condições de segurança. Estas condições são pavimentos em bom estado de conservação, sinais de trânsito visíveis e de fácil compreensão, conforto ambiental, fácil acesso aos serviços de utilidade pública, vegetação agradável, calçadas niveladas e sem obstáculos para os pedestres (Habib et al., 1999).

Os engenheiros e administradores modernos exigem informação imediata e atualizada para atender aos seus compromissos. Os vários aspectos da administração moderna, cujo domínio espacial é parte fundamental nos SIG, e os ramos da engenharia e transporte urbano requerem mapas topográficos e temáticos para apoiar suas necessidades. Planejamento,

projeto, supervisão, controle e muitas outras atividades devem ser fundamentadas em uma base de dados confiável aliada a outro tipo de informação.

Não são apenas os aspectos espaciais e geográficos que são importantes nos modernos sistemas de informações. Tanto no meio urbano quanto no rural, chegar a um sistema justo de taxaço é muitas vezes um desafio. Afora as questões técnicas, problemas políticos podem ser minimizados quando houver um sistema atualizado de informações, de modo que a comunidade possa ver-se com mais clareza e então encontrar a melhor solução.

SIG tem se desenvolvido desde os seus primórdios, mas ainda não o suficiente para erradicar a ignorância acerca do conhecimento espacial por parte das pessoas e suas comunidades. Parte deste atraso deve-se à ausência de uma completa cobertura de mapas em algumas partes do mundo. Esta situação piora proporcionalmente ao crescimento da escala do mapa. Muitas cidades e regiões, especialmente em países em desenvolvimento, não têm a cobertura atualizada do mapeamento mesmo em escalas médias e pequenas.

Na segunda metade do século passado, até os dias atuais, os mapas urbanos passaram a ser feitos a partir de fotografias aéreas. Recentemente, satélites de imageamento foram lançados com o propósito de produzir imagens orbitais de um metro de resolução espacial aproximadamente. Estas imagens têm potencial para modificar, ainda que parcialmente, o modo de produção de mapas, até aqui baseado em fotografias aéreas. Embora objetos menores possam ser registrados nas imagens orbitais à medida que os sensores ganham resolução espacial, imagens tomadas em rodovias dão uma vista muito próxima de objetos que às vezes não são bem visíveis em imagens tomadas de cima. Os detalhes podem ser avaliados em imagens tomadas por câmaras montadas em um veículo que se desloca ao longo de rodovias.

Além das imagens, a posição geográfica também pode ser determinada por meio de receptores GPS (*Global Positioning System*). Entretanto, em ruas e rodovias é comum o sinal do satélite GPS ou não alcançar o receptor ou fazê-lo afetado por uma profusão de estruturas como edifícios, copas de árvores, pontes, túneis etc, que causam interferência na recepção do sinal e conseqüentemente baixa qualidade no posicionamento do veículo. Quando isto ocorrer, o acoplamento de um sensor INS (*Inertial Navigation System*) ao receptor GPS torna possível recuperar a trajetória do veículo (Schwarz et al., 1993).

Um sistema móvel de mapeamento é composto basicamente de dois segmentos: móvel e fixo. O segmento móvel é um arranjo de diferentes tipos de sensores que são integrados em um sistema dedicado a obter dados espaciais. Um exemplo típico é um veículo no qual vídeo câmaras, receptores GPS, tecnologia INS e outros sensores são embarcados e conectados todos juntos, em geral, sob a supervisão de um microcomputador. Há sistemas terrestres, montados em

veículos automotores, aéreos, em helicópteros e aviões, e barcos, também equipados com sonares. Nestes sistemas, notadamente os terrestres e aéreos, as vídeo câmaras obtêm as imagens continuamente, os receptores GPS dão o posicionamento global, a IMU (*inertial measurement unit*) mede a orientação angular do sensor de imagem e também complementa as posições quando os dados GPS estão prejudicados por causa das interferências das estruturas ao longo das ruas e rodovias, conforme já mencionado.

O segmento fixo é caracterizado por um laboratório cujos componentes são principalmente computadores equipados com software apropriado para baixar, organizar, processar, analisar e visualizar os dados espaciais obtidos pela unidade móvel. A expressiva quantidade de dados determina que o processo consuma maior tempo no laboratório (unidade fixa), quando comparado ao tempo de aquisição de dados (unidade móvel), durante a missão de levantamento, uma vez que o veículo trafega a velocidades normais.

O primeiro sistema móvel de mapeamento foi proposto por Bossler et al. (1991). Três fatores concorreram para dar oportunidade à sua decisão: a pressão da sociedade civil sobre o congresso e o governo dos Estados Unidos da América (EUA), a fim de apressar o fornecimento de bens oriundos da caríssima pesquisa espacial; o fim da União Soviética, que encerrou um ciclo de hostilidades, que por sua vez impediam a sociedade civil de ter acesso a determinadas tecnologias, como é o caso dos sistemas inerciais de navegação; e os avanços da tecnologia de localização e navegação de veículos. As duas primeiras foram razões de ordem política e trouxeram benefícios tecnológicos em geral e particularmente a este novo método de levantamento. O último fator é de ordem científica e tecnológica e explica as origens do mapeamento móvel.

A motivação técnica do veículo de mapeamento é devida então aos avanços da tecnologia de navegação autônoma de veículos, tema associado com rodovias inteligentes (Shimogaki et al., 1999). Este novo ramo da engenharia de transportes requer que o mundo real, neste caso, ruas e rodovias e seus arredores, estejam repletos de dispositivos ópticos e eletrônicos, cujos dados e informações sejam detectados pelos sensores embarcados no veículo, que por sua vez possui um banco de dados com informações sobre as ruas e rodovias. A construção de bancos de dados deste tipo é uma das muitas aplicações de um sistema móvel de mapeamento, por causa de sua rápida e confiável aquisição de dados e imagens.

O maior benefício é a possibilidade de ter imagens e dados de ruas e rodovias em um banco de dados (computador) com todas as feições visíveis serem referenciadas a um sistema de coordenadas. Claro que estas feições podem ser associadas ou inseridas em um banco de dados geográficos. Muitos tipos diferentes de dados relacionados aos caminhos imageados podem ser derivados por meio de uma simples operação de medição nas imagens, proporcionando aos escritórios da

administração e engenharia a informação atualizada. Apenas como exemplo, suponha que o engenheiro urbano ou de transportes queira confirmar a altura de um túnel ou viaduto, ou corrigir o posicionamento dos sinais de trânsito, ou as condições de segurança do pavimento e das calçadas, ou o topo das árvores e dos postes de eletrificação entre outras coisas. Suponha também que o administrador queira verificar a eficiência do pessoal de limpeza. Todas estas informações pode ser medidas ou observadas nos escritórios significando economia de tempo e de recursos, decisões mais rápidas e maior eficiência.

A recepção contínua do sinal GPS em áreas urbanas e sob viadutos enquanto o veículo se desloca não é ainda um problema completamente resolvido. Embora seja possível contar com dispositivos inerciais para auxiliar a navegação contínua, muito tem que ser feito para melhorar esta conexão. A técnica amadureceu nos últimos quinze anos. As imagens consomem uma grande quantidade de meios de armazenamento e tempo de processamento. Dependendo da altura do sol e da posição da câmara, a luz pode causar sobre ou subexposição da imagem. Os custos ainda são muito altos para vislumbrar aplicações em larga escala. Dependendo da aplicação, a frequência de levantamento varia e também os custos.

A integração de sensores e a fusão de dados, o processamento de seqüência de imagens e bancos de dados de imagens levantam questões que chamam a atenção da comunidade científica internacional. Projetos de SIG, lenta mas seguramente, estão ganhando mais e mais adeptos, acarretando o aumento de demanda por mapas e bancos de dados espaciais. As comunidades urbanas dão mais atenção às questões ambientais e às respostas dos administradores aos problemas de crescimento urbano. Sistemas de transportes em geral tendem a aumentar no futuro, conforme a internet propiciará mais comércio e as pessoas em geral tendem a viver mais, aposentar e viajar. Grandes países têm extensas redes de rodovias e ferrovias. No outro extremo, os governos municipais têm também a incumbência de cuidar das estradas rurais, que são importantes vias de escoamento da produção agrícola. A rapidez com que o SMM captura os dados pode ajudar a manutenção destas estradas e também alimentar os SIG com informação atualizada.

Por trás de qualquer projeto que vise atender estas demandas, um mapa seja topográfico ou temático é necessário. Muitos países em desenvolvimento não dispõem de completa cobertura de mapas do seu território e eventualmente aquelas regiões onde um projeto de mapeamento foi feito no passado muito provavelmente não têm mapas atualizados. A atualização cartográfica é um tópico de interesse técnico e econômico. Naturalmente, um SMM por si só não fará todo o trabalho de mapeamento, mas poderá complementar o mapeamento aéreo e mais importante trará nova tecnologia para mapear ruas e rodovias.

O artigo apresenta uma solução de mapeamento topográfico de ruas. O protótipo

construído, denominado de Unidade Móvel de Mapeamento Digital (UMMD), não está completo ainda porque falta o módulo inercial (INS). Mesmo assim, foi possível desenvolver uma metodologia capaz de mapear arruamentos urbanos. O foco do artigo está nos aspectos de integração de técnicas distintas, principalmente o GPS com vídeo-imagens digitais, usadas para fazer o mapa. As fórmulas matemáticas relacionadas à solução foram omitidas. A ênfase é dada no processo, que é apresentado como uma nova técnica de fazer mapas de escala grande.

2. METODOLOGIA

O NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite with Time And Ranging-Global Positioning System*), mais conhecido apenas por GPS, é um sistema de rádio navegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA, com o objetivo de ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas. A alta precisão proporcionada pelo sistema e o desenvolvimento tecnológico dos receptores GPS propiciaram o florescimento de uma grande comunidade que emergiu dos vários segmentos de usuários civis.

A concepção do GPS permite que qualquer usuário, em qualquer lugar da superfície terrestre ou próxima dela, tenha ao seu dispor pelo menos quatro satélites acima do horizonte. Este número de satélites permite o posicionamento em tempo real. Os fundamentos do GPS consistem na medida do que se chama de pseudo-distância entre o usuário e os quatro satélites. Com as coordenadas conhecidas dos satélites, com referência a um sistema apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do receptor (X,Y,Z), com respeito ao sistema de referência do satélite. Do ponto de vista geométrico, somente três satélites são suficientes (três equações de distância e três coordenadas incógnitas). A quarta observação é necessária devido à falta de sincronismo entre os relógios do receptor e dos satélites; isto aumenta em uma dimensão o sistema de equações a ser resolvido (4x4).

As observáveis fundamentais do GPS são as pseudo-distâncias e a fase da portadora. Várias técnicas de posicionamento – absoluto, relativo e diferencial – foram desenvolvidas para processar as observáveis, cujas precisões variam de 20m, após o desligamento da disponibilidade seletiva (SA), até poucos milímetros, dependendo também da qualidade do equipamento. A técnica de posicionamento diferencial (DGPS), desenvolvida principalmente para fins de navegação, fornece melhor precisão do que as dadas por posicionamento absoluto. Além disto, DGPS tem a capacidade de proporcionar posicionamento em tempo real e pós-processado. Um conceito simples de DGPS consiste de um receptor fixo em uma estação de coordenadas conhecidas enquanto um segundo receptor move-se, ambos rastreando os satélites visíveis. O processamento dos dados calcula as correções para as posições, as pseudo-distâncias, ou a fase de batimento

da onda portadora. Estas correções para o posicionamento em tempo real são enviadas por satélites de comunicações ou radiotransmissão para serem aplicadas aos pontos de rastreio nas proximidades da estação melhorando sua precisão.

Se houver menos do que quatro satélites visíveis, alguns procedimentos podem ser aplicados. Entre eles um sistema de sensores inerciais pode ser usado para interpolar as posições GPS quando a recepção de um dado satélite for obstruída. Os sensores inerciais tem basicamente duas funções em um protótipo SMM: o preenchimento das posições em branco de uma seqüência de dados de navegação GPS e a determinação da atitude do sensor de imagem (vídeo câmara). A primeira mantém a posição do sensor conhecida com respeito a um sistema referencial fixo e o outro mede a rotação do sistema referencial da imagem em relação ao referencial fixo.

De uma maneira simples, *INS* é um conjunto de instrumentos projetado para registrar as variações do estado de inércia de um corpo rígido, a fim de controlar ou monitorar sua trajetória. As posições são determinadas com base nas medidas fornecidas por uma unidade inercial de medição (*IMU*), que é o componente principal. A *IMU* é composta de acelerômetros e inclinômetros ou giroscópios. Os acelerômetros percebem mudanças na variação da aceleração; os giroscópios percebem alterações na orientação angular de um eixo. Se a posição inicial for conhecida (\mathbf{r}_0) com respeito a um sistema de referência e a velocidade (\mathbf{v}) de um corpo em função do tempo (\mathbf{t}), \mathbf{v} é obtida diferenciando-se a posição (\mathbf{r}) em relação a \mathbf{t} . A aceleração \mathbf{a} é dada por diferenciação de \mathbf{v} em relação a \mathbf{t} . Integrando-se \mathbf{a} duas vezes, obter-se-á a posição final (\mathbf{r}_e). A teoria subjacente aos giroscópios baseia-se na lei de conservação do momento linear e angular. Por meio de uma equação diferencial ordinária ($\mathbf{r}'_t = \mathbf{r}_t \cdot \mathbf{W}_t$), uma matriz anti-simétrica de rotação ($\mathbf{\Omega}$), contendo as três observações angulares dadas pelos giros da *IMU*, é pré-multiplicada pelo vetor incógnito da posição (\mathbf{r}) para igualar a velocidade (\mathbf{r}'), também medida pelos acelerômetros da *IMU*. A solução analítica da equação diferencial dá a posição do vetor do corpo rígido.

A fim de integrar os dados DGPS e INS, um modelo matemático é necessário para estabelecer um relacionamento entre eles, tendo um ponto comum ou o vetor deslocamento (*offset*) entre os dois centros, que varia dependendo do desenho de cada equipamento e das separações físicas entre eles. Se o sensor INS for inicializado em uma estação de referência, uma terceira coordenada aparece e então é necessário determinar os parâmetros de transformação entre o sistema referencial local e o global. Em geral, uma transformação conforme é adequada para tal relacionamento geométrico. Acelerações dinâmicas devido à força da gravidade afetam os dados INS (*drifts*), exigindo equações adicionais para filtrar e compensar os dados, o que é razoavelmente feito por filtro de Kalman (Junkins, 1978). Mais complicações aparecem quando uma câmara ou outro sensor de imagem é adicionado ao

conjunto de equipamentos, tornando o sistema móvel mais complexo. Neste caso, um quarto sistema referencial demandará prévia calibração para determinar os três pontos notáveis envolvidos: o centro eletrônico da antena do receptor GPS, a origem do sistema referencial de coordenadas do sensor inercial e o centro perspectivo das lentes da câmara.

Nos casos de ausência do INS, a orientação das imagens é dada por fototriangulação de feixes de raios adaptada ao problema. Esta solução foi denominada de caminhamento fotogramétrico (Silva, 1996; Silva, 1997).

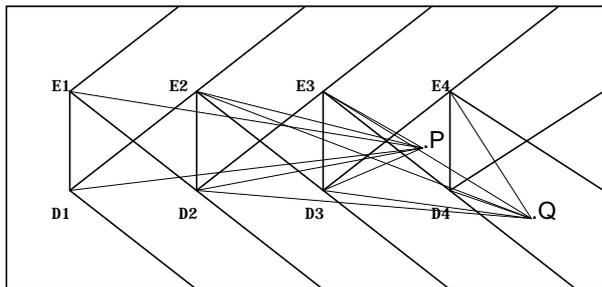


Fig. 1 – Imagens de pontos-objeto em uma seqüência de pares de imagens

A figura 1 mostra um ponto-objeto ao longo da trajetória observado em duas ou três estéreo-bases, portanto em quatro ou seis imagens. Simples, dupla ou tripla interseção fotogramétrica pode calcular as coordenadas espaciais do ponto objeto. Teoricamente, a estéreo-base mais próxima proporciona a melhor precisão para um ponto objeto, quando a interseção fotogramétrica é calculada separadamente para cada base; da base mais distante obtém-se a pior precisão. Quando o cálculo leva em conta múltiplas interseções, a precisão final é diminuída principalmente por causa das bases mais distantes, devido à geometria desfavorável, e menor qualidade das observações.

Conhecidos os parâmetros de navegação e o posicionamento, o veículo pode ser locado em um mapa digital ou imagem orbital (fotografia aérea ou imagem orbital), como uma ferramenta de auxílio ao motorista. Esta é uma tendência emergente na condução autônoma de veículos e nos sistemas automotivos inteligentes. Em geral, os mapas digitais são baseados em tecnologia vetorial e as imagens na tecnologia matricial (*raster*). Vetores são mais rápidos de processar, mas demandam algoritmos mais complexos; imagens matriciais demandam grande capacidade de armazenamento e processamento e algoritmos menos complexos. Mapas digitais embarcados e bancos de dados geográficos comporão o painel frontal do veículo para auxiliar o condutor, incluindo a tecnologia do comando de voz.

Um banco de imagens de ruas e rodovias pode ser construído em consequência de um levantamento por meio de sistemas móveis (Oliveira, 2001) e pode também ser integrado a um SIG urbano ou de transportes. Para isto não há dificuldade teórica, mas questões de ordem prática e operacional requerem soluções eficientes e econômicas. Questões de

intercâmbio e conversão de dados e sobretudo a enorme quantidade de dados para processar aguardam melhores soluções tecnológicas em um futuro próximo.

A metodologia de mapeamento com SMM amadureceu, mas ainda requer aprimoramentos. Como se vê, os fundamentos da teoria e da tecnologia do mapeamento móvel alicerçam-se nas disciplinas Geodésia Espacial, Sistemas Inerciais, Teoria da Estimção e Filtragem de Kalman, Navegação e Processamento Digital de Imagens. Há ainda muitos tópicos de pesquisa que causarão a consolidação da técnica, conforme os problemas forem sendo resolvidos. Os principais tópicos têm sido a determinação da posição do veículo e também da atitude do sensor de imagem, pós-processado ou em tempo real, georreferenciamento direto, calibração e integração dos sensores, extração e reconhecimento automático de feições em uma seqüência de imagens, bancos de imagens georreferenciadas e a fusão de dados de mapeamento móvel com outras fontes de dados em um SIG. Esta lista sugere que a tecnologia de mapeamento móvel tem muito a crescer, a fim de ser empregada em um amplo campo de aplicações geomáticas.

3. PROTÓTIPO

Antes de desenvolver o protótipo de mapeamento móvel, uma situação de coletar dados de um arruamento urbano foi simulada usando uma metodologia alternativa denominada de caminhamento fotogramétrico. A idéia por trás do projeto foi a de compreender o processo de construir o mapa com um método não convencional de mapeamento topográfico. Houve a contribuição significativa da aprendizagem sobre o relacionamento entre os estágios que conectam as principais fases do processamento de dados, em se tratando da aplicação do caminhamento fotogramétrico (Silva et al., 1999).

Esta seção apresenta o protótipo denominado Unidade Móvel de Mapeamento Digital (UMMD) composto de um veículo tipo van (Kombi VW), duas vídeo câmaras digitais (Sony DSR200A) montadas como uma estéreo câmara no topo do veículo, dois receptores GPS (Ashtech Reliance and Garmin 12 XL), um computador portátil (Fujitsu Pentium 266MHz), e um sistema de sincronização baseado na emissão de som (fig. 2).



Fig. 2 – O protótipo da Unidade Móvel de Mapeamento Digital

Além da unidade móvel, no Laboratório de Mapeamento Móvel (LaMMov) há computadores

usados para baixar e processar as imagens digitais gravadas em fitas apropriadas (DVCAM). Software especialmente desenvolvidos no LaMMov realizam as fases fotogramétricas e cartográficas. Estes métodos e equipamentos em conjunto proporcionam a fusão de técnicas distintas de fazer mapas topográficos e também dão aos pesquisadores os resultados da aplicação destas diferentes técnicas sob uma abordagem moderna e alternativa, de modo a ser possível a construção de mapas de ruas e rodovias e de seus arredores.

4. CONSTRUÇÃO DO MAPA

Até o presente, os sistemas móveis em uso e em desenvolvimento em diversos países foram orientados para realizar levantamentos principalmente de rodovias, porque estas são menos susceptíveis à perda de contato com o GPS. Observando as imagens, os eixos e as laterais de rodovias são extraídos e inseridos em bancos de dados de SIG locais, regionais e nacionais (Habib, 2000); as condições do pavimento são inspecionadas (Nakane et al., 1999); e as estruturas e obras de arte, tais como pontes e viadutos, e as larguras das faixas de rolamento são medidas (He, 1999).

À medida que a integração de dados GPS/INS recebe aprimoramentos, as aplicações passam a incluir modelos 3D de cidades, realidade virtual, SIG urbano, gerenciamento de dados espaciais e de serviços de utilidade pública (*utilities*), navegação automotiva e mapeamento topográfico. O uso desta tecnologia de mapeamento por si só não é uma razão forte para justificar o desenvolvimento de um protótipo de SMM. Contudo, é verdade que há milhares de municípios em todo o mundo que não têm cobertura de mapas em escalas adequadas de seus territórios, tanto urbano quanto rural. A mesma observação acerca da ausência ou da desatualização cartográfica aplica-se também às malhas de ruas e rodovias nos níveis municipal, regional e nacional. Estas necessidades podem justificar os SMM em aplicações de propósito de mapeamento, especialmente quando combinadas com imagens aéreas.

4.1. *Orientação Interior das Câmaras*

Antes de ir a campo executar o levantamento, um projeto de calibração de câmaras foi esboçado e realizado com ambas as vídeo câmaras digitais (Sony DSR200A) montadas na armação fixada no topo do veículo de forma a representar uma estéreo câmara apontada para a frente com os dois eixos ópticos horizontais e paralelos entre si (caso normal). Este tipo de câmara de vídeo não é construída para projetos fotogramétricos e portanto sua geometria interna é instável. As câmaras são ajustadas para operar no modo manual e grande angular; quando ligadas automaticamente seus controles comandam as lentes para as posições referentes à distância focal mais curta (valor nominal de 5,9 mm). Naturalmente, este comprimento varia em torno do valor nominal todas as vezes que a câmara é ligada. Um campo de calibração

foi construído com 54 alvos fixados em uma parede. As coordenadas dos alvos foram calculadas por meio de interseção à vante, a partir de uma base e ângulos horizontais e verticais determinados por uma estação total (Sokkia SET5F). O veículo e portanto as câmaras foram posicionados defronte à parede para tomar seis imagens, sendo duas inclinadas à esquerda, duas frontais, e duas inclinadas à direita. Em outras palavras, seis imagens que significam três com a câmara esquerda e três com a direita em três posições diferentes, configurando a auto calibração pelo método das câmaras convergentes (Olivas, 1980).

As imagens foram transferidas das fitas de vídeo para um computador com dois discos rígidos: um IDE para o sistema operacional e aplicativos e o outro (SCSI) para a edição não linear (miroVIDEO DVTolls para capturar as imagens e Adobe Première LE para a seleção das imagens). Um quadro de cada posição (esquerda, central e direita) foi selecionado de uma seqüência curta (AVI) e transformado em bitmap (BMP). FOTOCIC (*FOTOComparador de Imagens Consecutivas*) é o programa desenvolvido com o Borland Builder C/C++ 3.0 para medir coordenadas de pontos nas imagens; as coordenadas foram então transformadas em fotocoordenadas. O tamanho da matriz de pixels é de 4,8 mm (h) x 3,6 mm (v) ou 720 (h) x 480 (v) pixels, que significa um pixel equivalente a 6,7 μm (h) x 7,5 μm (v). Tratamento apropriado foi feito para considerar a proporção (*aspect ratio*). A tabela 1 mostra três estimativas distintas (I, II e III) dos parâmetros de orientação interior feitas em dias e em projetos diferentes. A variação é significativa, indicando a necessidade de uma calibração específica para cada projeto. A terceira (III) refere-se à aplicação descrita neste artigo.

A estéreo base foi medida com uma fita de invar que mostrou 0,94 m e este resultado foi introduzido como uma injeção no programa FOTRAC (*FOTOTriangulação com Auto Calibração*). Somente quatro parâmetros foram considerados, porque o diâmetro das lentes é de apenas 52 mm (Oliveira & Silva, 1999).

4.2. *Levantamento de Campo e Processamento dos Dados*

A antena do receptor móvel (Ashtech Reliance: L1 e C/A) foi colocada no topo do veículo à meia distância entre as duas câmaras. A antena do receptor Ashtech Z-XII (L1, L2; C/A, P, Y) foi fixada na estação de referência. A obtenção do sinal GPS foi estabelecida em um segundo (1 s) para ambos os receptores.

A sincronização das vídeo câmaras foi estabelecida quando deu-se o início da aquisição das imagens pelo controle remoto. A sincronização das câmaras com o sinal GPS foi feita usando o sinal sonoro emitido por um computador portátil Fujitsu (Pentium 266 MHz), comandado por um programa em linguagem C (Hasegawa et al., 1999), que registrou o sinal da posição emitido pelo receptor GPS Garmin 12XL a cada

dois segundos (2 s) e o tempo correspondente do relógio do computador portátil. O sinal sonoro (bip) foi enviado para as vídeo câmaras por meio de dois cabos que conectavam uma caixa de som às entradas de som das câmaras (*microphone jack*). Este aparato produz

quadros (*frames* e portanto imagens) marcados com um pico de som (ruído) na trilha de som, correspondentes aos tempos do computador portátil que fôra alinhado ao relógio do Reliance (a fim de se ter a mesma referência de tempo).

TABELA 1
TRÊS ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR

Sony DSR200A	Projeto I		Projeto II		Projeto III	
E: esquerda D: direita	parâmetro	desv. padrão	parâmetro	desv. padrão	parâmetro	desv. padrão
E f (mm)	5,891	0,002	6,058	0,078	6,873	0,098
E x ₀ (mm)	-0,132	0,002	0,008	0,031	0,553	0,002
E y ₀ (mm)	-0,001	0,002	0,004	0,030	0,077	0,036
E k ₁ (mm ⁻²)	-0,00297	0,00016	-0,00398	0,00185	0,050	0,003
D f (mm)	6,041	0,002	6,000	0,056	6,406	0,069
D x ₀ (mm)	0,035	0,002	0,172	0,082	0,215	0,099
D y ₀ (mm)	0,055	0,002	0,155	0,055	0,010	0,099
D k ₁ (mm ⁻²)	-0,00615	0,000244	-0,00708	0,00231	0,005	0,003

O avanço da estéreo-base foi planejado para ser da ordem de 20 m no máximo no meio do quarteirão e cerca de 5 m quando dobrando-se uma esquina. Isto condicionou a velocidade do veículo a ser de 36 km/h a 9 km/h, respectivamente. Os avanços da estéreo-base são as distâncias que o veículo percorre ao longo das ruas durante o intervalo de tempo (2 s) para obter o sinal GPS da próxima posição (dado pelo Garmin 12XL). Elas estão esquematicamente ilustradas na fig. 1 (E₁D₁, E₂D₂, ...).

A área escolhida para realizar o projeto de mapeamento móvel consistiu de três quadras urbanas no bairro Jardim Maracanã de Presidente Prudente, SP. Um pouco menos do que cinco minutos foram gastos na aquisição das imagens e dados GPS na área selecionada. Contudo, foram gastos cerca de vinte minutos desde o início da seção de levantamento para resolver os problemas de ambigüidade. As coordenadas WGS84 (*World Geodetic System 1984*) foram transformadas para SAD69 (*South American Datum 1969*) e daí para UTM (*Universal Transverse Mercator*, $\lambda = 51^\circ$ W). Os dados GPS foram processados usando software Reliance com base no método DGPS e produziu os seguintes desvios padrões para as coordenadas UTM de 57 estações: 1,7 cm (E); 2,0 cm (N), e 5,1 cm (h). As posições calculadas das 57 estações (P₁ e P₂, fig. 3) foram estendidas aos 114 centros perspectivos (CP₁ e CP₂, fig. 3), que correspondem aos 57 estéreo pares.

A informação de altura foi derivada dos dados GPS e foram transformadas para alturas ortométricas usando um modelo local de transformação de superfícies (Oliveira, 1998). Todas as coordenadas de estações, pontos e linhas do projeto foram posicionados em um sistema híbrido formado por coordenadas UTM (E₀,N₀) e alturas ortométricas (H). As coordenadas altimétricas foram calculadas com base no modelo geoidal local. O sistema híbrido foi considerado ortogonal porque as dimensões da área teste puderam

ser negligenciadas neste particular e então as coordenadas-objeto aproximadas (E,N) foram introduzidas diretamente nas equações de colinearidade (seção de fototriangulação adiante).

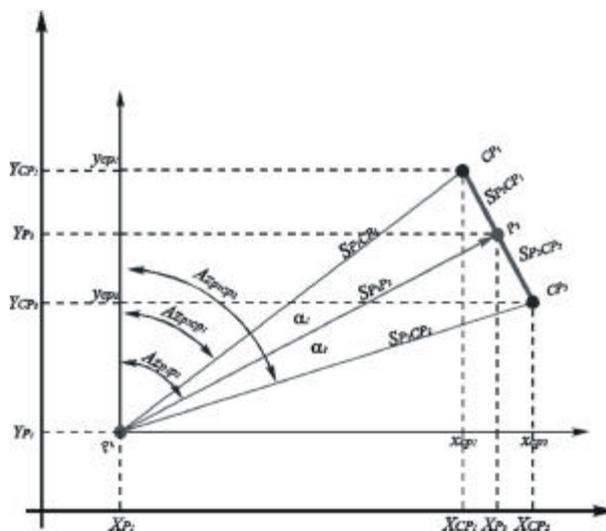


Fig. 3 – Duas posições consecutivas da antena GPS e os dois centros perspectivos

Considerando a fig. 3, as coordenadas dos dois centros perspectivos foram determinadas a partir de duas posições consecutivas da antena do GPS, mediante as seguintes suposições: o avanço da base (P₁P₂) ocorreu em uma linha reta, o centro da antena (P₂) e os dois centros perspectivos (CP₁, CP₂) eram colineares com P₂ rigorosamente no meio, e ambas as linhas retas eram ortogonais em P₂. A distância P₁P₂ e o azimute AzP₁P₂ foram derivados das coordenadas GPS calculadas de P₁ e P₂. As correspondentes matrizes de covariâncias foram também calculadas pela lei de propagação de covariâncias (Gemael 1994).

4.3. Fototriangulação

O ajustamento dos feixes de raios foi calculado pelo programa TFTC (*Triangulação de Fotos Terrestres por Caminhamento Fotogramétrico*) com o objetivo de estimar a atitude de ambas as câmaras em cada estação. As fotocoordenadas foram medidas com o FOTOCIC clicando-se o *mouse* com um erro estimado em torno de 3 pixeis. Além da observação de fotocoordenadas, pontos e linhas foram coletadas concomitantemente e seus códigos e rótulos foram registrados em camadas (*layers*) distintas para serem representados no produto final (o mapa das ruas). Alguns destes pontos foram usados como pontos de passagem. A figura 4 ilustra o procedimento de medição com dois pares de imagens. Quando o par de baixo é terminado, ele dá lugar ao par de cima, em cujo lugar o próximo par da seqüência é carregado e assim por diante.

O projeto foi seccionado em seis blocos de imagens com 19 pares em média. Com os centros perspectivos submetidos à injeção de peso de 10.000 (equivalente ao desvio-padrão igual a 0,01 m), a média estimada dos desvios padrões foi de aproximadamente 2' para ômega (ω) e fi (ϕ) e 2° para capa (κ), minutos e graus sexagesimais; o desvio-padrão estimado para as coordenadas dos pontos de passagem foi da ordem de 1,5 m. Estes resultados aparentam ser muito piores do que aqueles dados pela fototriangulação aérea e terrestre usuais, mas a comparação direta não é apropriada, porque as redes têm desenhos geométricos muito diferentes. Duas razões já discutidas anteriormente (Silva & Oliveira, 1998; Silva et al., 1999) são lembradas na tentativa de explicar os resultados: a geometria do caminhamento fotogramétrico é fraca e dificuldades para selecionar pontos de passagem.



Fig. 4 – A técnica de medição de dois pares consecutivos de imagens

4.4. Interseção Fotogramétrica

Os componentes das cenas de ruas, como postes, árvores, cabines telefônicas, caixas de correio, latas de lixo, paradas de ônibus, as linhas de construção e meio-fio e as divisórias dos lotes urbanos, tiveram

suas respectivas coordenadas UTM calculadas por interseção fotogramétrica. As coordenadas-objeto foram calculadas a partir dos doze parâmetros de orientação exterior e de quatro equações de colinearidade sem iterações. Isto foi possível porque houve agrupamento de parâmetros após alguma manipulação algébrica, de modo que obteve-se um sistema de equações lineares de quatro equações a três incógnitas (E, N, h). INTERFOTO (*INTERseção FOTOGramétrica*) é o software que calculou as interseções.

4.5. Desenho Cartográfico

Com o MicroStation SE, todas os pontos e feições lineares que haviam sido armazenados nas camadas planejadas foram editados e representados em um mapa das ruas, o qual inclui curvas de nível interpoladas das alturas ortométricas. Os pontos de alinhamento (meio-fio e linha de construção) foram forçados a obedecer a uma linha reta. Nas esquinas, uma equação de arco submeteu os pontos de alinhamento. Uma superfície topográfica foi interpolada para gerar curvas de nível usando o Surfer com base nas altitudes das 57 estações móveis. A figure 5 mostra o mapa final das ruas da área selecionada na escala 1:2000 totalmente feito a partir dos dados e imagens coletados pela UMDM e processados no LaMMov. Na verdade, o original cartográfico foi projetado para as dimensões do papel A3, de modo que a fig. 5 é apenas uma redução dele, por razões de espaço.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A acurácia do produto final foi avaliada por meio da comparação das coordenadas UTM extraídas do mapa com as coordenadas GPS (transformadas para UTM) determinadas em 29 pontos de verificação na área teste. As discrepâncias médias (Δ) foram $-0,064\text{m}$ e $-0,212\text{m}$ para as coordenadas E e N respectivamente. As raízes quadradas dos erros médios quadráticos correspondentes (σ_{Δ}) deram $0,938\text{m}$ e $0,811\text{m}$. Foram realizadas as análises de tendência e acurácia, de acordo com a metodologia proposta por Galo & Camargo (1994), com as discrepâncias e desvios-padrões calculados para E e N. A tabela 2 mostra um sumário dos números envolvidos. A análise de tendência baseia-se no sistema de hipóteses ($H_0: \Delta_{\text{média}}=0$; $H_1: \Delta_{\text{média}}\neq 0$). As estatísticas t de Student calculadas foram de $0,36\text{m}$ (E) e $1,41\text{m}$ (N), ambas menores do que a estatística teórica $t_{28;5\%} = 1,7$, sugerindo que as discrepâncias são insignificantes e portanto a carta topográfica ser isenta de tendência.

O decreto nº 89.817 (Brasil, 1984) afirma que o erro padrão (EP) para mapas da classe A é igual a $0,3\text{mm}\cdot\text{M}$ (M é o módulo ou fator de escala do mapa); na classe B, EP é igual a $0,5\text{mm}\cdot\text{M}$, e na classe C, EP é $0,6\text{mm}\cdot\text{M}$. Considerando estas classes, a hipótese nula ($\chi^2_{\text{calc}} \leq \chi^2_{(28;10\%)}$) não é rejeitada na classe C, ao nível de confiança de 10%. Ou seja, 90% de todas as

coordenadas extraídas do mapa têm erro planimétrico inferior a 2,0m (1,0mm·M).

TABELA 2 – ANÁLISE DE TENDÊNCIA E ACURÁCIA

Parâmetro	$\Delta(m)$	$\sigma_{\Delta}(m)$	$t_{amostral}$	$t_{28;0,05}$	X^2_A	X^2_B	X^2_C	$X^2_{28;0,1}$
E	-0,064	0,938	0,36	1,7	136,95	49,30	34,23	37,92
N	-0,212	0,811	1,41	1,7	102,21	36,79	25,55	37,92

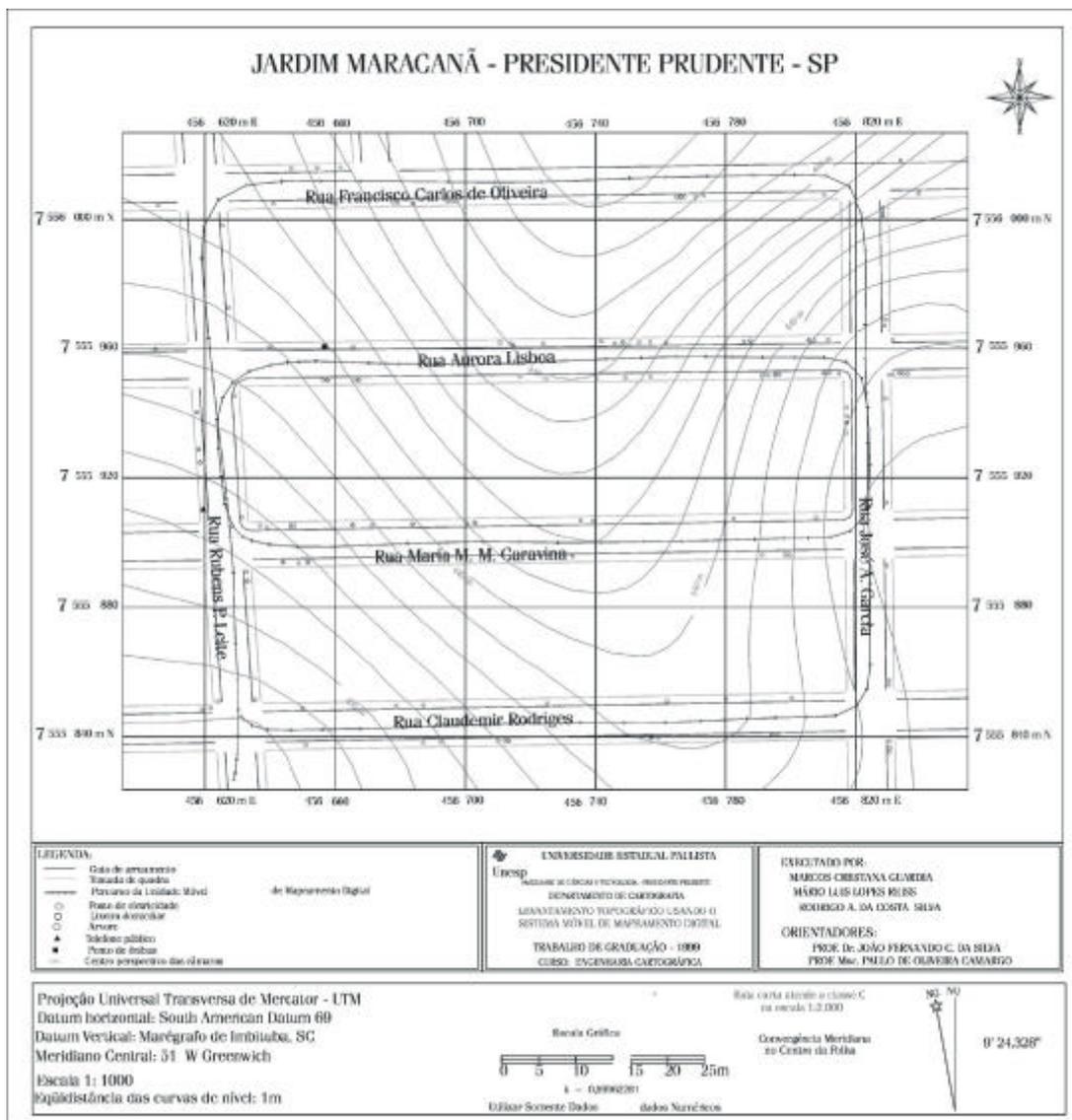


Fig. 5 – Mapa de ruas (1:2000) construído com dados obtidos pela unidade móvel de mapeamento digital.

6. CONCLUSÃO

O artigo introduziu os fundamentos e principais problemas da tecnologia de mapeamento móvel. Ao nível municipal, tanto as áreas urbanas quanto as rurais podem ser beneficiados com estes sistemas. Ao nível nacional, muitos países, especialmente aqueles com extensas redes de estradas, podem tirar vantagem desta técnica. O projeto de aplicação apresentado demonstrou o potencial da tecnologia de mapeamento móvel para mapear ruas. O caminhamento fotogramétrico mostrou

ser uma opção para superar a ausência do sistema inercial e orientar as imagens. O processo de construção do mapa está ainda muito dependente de trabalho visual e manual. A fase de campo é bastante rápida quando comparada à fase laboratorial. Em um futuro próximo, novos projetos objetivarão a automação de ambas as fases, sobretudo a laboratorial. A consequência esperada é a melhoria na qualidade dos dados, processamento mais rápido e melhor precisão do produto final, que pode ser um mapa digital, um banco de dados (de imagens georreferenciadas) ou ambos.

Profissionais das áreas de saneamento básico, energia elétrica, telecomunicações, planejamento urbano e rural, obras municipais, projeto de estradas, entre outras, que conheceram o sistema desenvolvido e os seus resultados (mapas), afirmaram ser tecnicamente viável sua aplicação para fins de mapeamento ou simples inspeção visual.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSSLER, J. D. & GOAD, C. C. GPS and GIS Map the Nation's Highways. *Geo Info Systems*, 3 : 26-37, 1991.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão de Cartografia. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.
- GALO, M. & CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no Controle de Qualidade de Cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1. *Anais...*, Florianópolis: UFSC. t.2, p.41-8, 1994.
- GEMAEL, C. Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas. Curitiba: Editora UFPR. 319p, 1994.
- HABIB, A. F. Matching Road Edges in Stereo-Image Sequences Using Data Association Techniques. *Photogram. Eng. & Remote Sens.* (J. of the Amer. Soc. of Photogram. & Remote Sens.) 66(1):91-8, 2000.
- HABIB A. F.; UEBBING, R. & NOVAK, K. Automatic Extraction of Road Signs from Terrestrial Color Imagery. *Photogram. Eng. & Remote Sens.* (J. of the Amer. Soc. of Photogram. & Remote Sens.) 65(7):597-602, 1999.
- HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; MONICO, J. F. G. & IMAI, N. N. Sistema de Localização e Navegação Apoiado por GPS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 19., Recife. *Anais...* Rio de Janeiro: Soc. Bras. Cartogr., Geodes., Fotogram., Sensor. Remoto. v.19, t.2. 6p. (CD-ROM), 1999.
- HE, G. Application of Photogrammetric Image Data for Roadway Construction. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, Bangkok, Thailand. *Proceedings...* ISPRS, v.32, t.2W10, p. 5.A.3.1-7, 1999.
- JUNKINS, J. L. An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems. Alphen aan den Rijn: Sijthoff&Noordhoff. 339p, 1978.
- LI, R. & MURAI, S. (eds.). International Workshop on Mobile Mapping Technology. Bangkok, Thailand. *Proceedings...* ISPRS, IAG, FIG, 1999.
- NAKANE, T.; TAKAGI, H. & OZAWA, M. Crack Situation Grasp of Digital Image Method. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, Bangkok, Thailand. *Proceedings...* ISPRS, v.32, t.2W10, p. 5.B.2.1-4, 1999.
- OLIVAS, M. A. A. Calibração de Câmaras Fotogramétricas – Aplicação dos Métodos: Câmaras Convergentes e Campos Mistos. Curitiba, 1980.
- Mestrado, dissertação. 98p. Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná.
- OLIVEIRA, K. C. L. Modelo Geoidal para a Região de Presidente Prudente. Pres. Prudente: Unesp. 46p, 1998.
- OLIVEIRA, R. A. Concepção, Desenvolvimento e Aplicação do Banco de Imagens Georreferenciadas no Contexto do Mapeamento Terrestre Móvel. Presidente Prudente, 2001. Mestrado, dissertação. 74p. Curso de Pós Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista.
- OLIVEIRA, R. A. & SILVA, J. F. C. Calibração de um Par de Vídeo Câmaras Digitais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 19., Recife. *Anais...* Rio de Janeiro: Soc. Bras. Cartogr., Geodes., Fotogram., Sensor. Remoto. v.19, t.4. 4p. (CD-ROM), 1999.
- SCHWARZ, K. P.; CHAPMAN, M. A.; CANNON M. W. & GONG, P. An Integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data. *Photogram. Eng. & Remote Sens.* (J. of the Amer. Soc. of Photogram. & Remote Sens.) 59(11):1667-74, 1993.
- SHIMOGAKI, Y.; KITAGAWA, T.; YAMANO, Y. & TAKAHASHI, K. Mobile Mapping Technologies for Safety Driving Assistance in ITS. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, Bangkok, Thailand. *Proceedings...* ISPRS, v.32, t.2W10, p. 5.B.3.1-7, 1999.
- SILVA, A. R.; BATISTA, J. C.; OLIVEIRA, R. A.; CAMARGO, P. O. & SILVA, J. F. C. Surveying and Mapping of Urban Streets by Photogrammetric Traverse. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, Bangkok, Thailand. *Proceedings...* ISPRS, v.32, t.2W10, p. 5.A.5.1-4, 1999.
- SILVA, J. F. C. Solução Sequencial para o Caminhamento Fotogramétrico. *Coletânea Politécnica: R. Bras. Tecnol. e Ci.* 1(1):92-6. São Paulo: EPUSP, 1996.
- SILVA, J. F. C. Fototriangulação no Caminhamento Fotogramétrico. Presidente Prudente. Livre docência, tese. 85p. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp, 1997.
- SILVA, J. F. C. & OLIVEIRA, R. A. Triangulation of a Sequence of Terrestrial Digital Images. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM - DATA INTEGRATION: SYSTEMS AND TECHNIQUES, Cambridge, UK. *Proceedings...* ISPRS, v.32, t.2, p.273-7, 1998.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), cujo apoio financeiro foi essencial para construir o protótipo e o laboratório, através dos processos 97/11049-6, 99/00807-2, 99/04831-5. Os autores agradecem também à administração do campus da Unesp de Presidente Prudente.