

A Survey On Visible Light Positioning And Its Applications For Autonomous Mobility

Mateus Rodrigues Santos, Danilo Alves de Lima, Arthur de Miranda Neto

Resumo—The rise of technologies in the field of autonomous mobility has allowed, recently, a great advance in relation to the level of automation of intelligent vehicles. However, there are several elements to be improved in order to have these vehicles on road. One of them is the global positioning at low cost. In this scope, this study is a survey on Visible Light Positioning techniques with the objective of tracing the state of the art on this technology, searching applicability to the field of autonomous mobility, in order to overcome the positioning barrier. The results catalogued from the literature on the actual scenario justify the application proposal.

Index Terms—Localization, Visible Light Communication and Positioning, Signal Processing, Intelligent Vehicles.

I. INTRODUÇÃO

SISTEMAS de posicionamento são aqueles usados para se obter o posicionamento de objetos no espaço por meio de uma série de técnicas que variam de acordo com o propósito da aplicação. A tecnologia mais comum utilizada, hodiernamente, ainda é o Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*). Entretanto, novas aplicações vêm requerendo novas tecnologias que aumentam a precisão e reduzam problemas atrelados aos GPS, tais como a perda de sinal em ambientes internos e a grande interferência em ambientes urbanos com alta densidade de edificações. A busca por tecnologias que aperfeiçoem sistemas de posicionamento se faz de grande importância para a mobilidade autônoma no cenário atual de desenvolvimento. As tecnologias alternativas principais, em estudo, são diversas, como a localização via frequências de Rádio; via wi-fi, e a que se faz objeto de estudo deste trabalho, Comunicação por meio da Luz Visível (VLC - *Visible Light Communication*) [1], [2].

No contexto da VLC, é importante remeter à ascensão de tecnologias nos dispositivos de iluminação de estado sólido (SSL - *Solid State Lighting*) como os Diodos Emissores de Luz (LED - *Light Emitting Diode*) e sua popularização na iluminação artificial em vários níveis, desde residencial à pública. Isto se deve principalmente à sua alta eficiência (200% de iluminação por unidade de consumo de energia em relação às lâmpadas fluorescentes), alta durabilidade (500% em relação às fluorescentes), e um baixo custo de implementação. Essa popularização rendeu a descoberta de métodos de comunicação não conhecidos antes. A partir da utilização de fotodetectores (sensores de luz, fotodiodos, fototransistores, entre outros) ou sensores de imagem (câmeras fotográficas),

são estudadas técnicas de transmissão de dados que superam a velocidade de transmissão por ondas de rádio, atualmente amplamente utilizada para comunicações. É válido ressaltar que os sistemas citados cumprem o objetivo de iluminação tanto quanto de transmissão de dados [3].

Arelado ao desenvolvimento da tecnologia de VLC, está o Posicionamento por meio da Luz Visível (VLP - *Visible Light Positioning*), tecnologia que consiste no uso de técnicas, baseadas em VLC, para o posicionamento referenciado de objetos. As técnicas de comunicação, em conjunto com um processamento de sinais específico para o posicionamento, permitem que um sistema seja capaz de calcular sua localização espacial a partir de diferentes fontes de luz. A tecnologia fornece, segundo resultados obtidos até então, sistemas robustos e versáteis que resolvem os principais problemas da utilização de GPS; a literatura prevê posicionamentos até 20 vezes mais precisos que os sistemas de GPS convencionais e sistemas que atendem a ambientes urbanos e principalmente a ambientes internos. O objetivo desse estudo é, então, modelar o funcionamento básico dos sistemas de VLP para analisar suas principais técnicas e traçar um comparativo destas com base nos resultados encontrados até então na literatura, analisando os sistemas quanto à sua robustez e aplicabilidade.

II. COMUNICAÇÃO POR MEIO DA LUZ VISÍVEL

Para estudo das principais técnicas de posicionamento empregadas para VLP, é importante retomar a tecnologia que a originou, a VLC. E, compreender os parâmetros fundamentais dos dispositivos envolvidos que serão aplicados na modelagem das técnicas de posicionamento. Os dispositivos eletrônicos de iluminação de estado sólido denominados LEDs, hodiernamente popularizados para utilização em larga escala, têm uma versátil aplicação permitindo o desenvolvimento da VLC, devido a uma de suas características principais, o tempo de resposta. Esses dispositivos podem ser modulados em frequências até na faixa de centenas de milhares de oscilações por segundo, frequências a partir de 200Hz são recomendadas para modulação sem efeitos prejudiciais à visão humana, permitindo o cumprimento do propósito de iluminação e comunicação pelo mesmo dispositivo.

Outro parâmetro a ser considerado diz respeito às frequências eletromagnéticas emitidas pelos LEDs. Esse parâmetro é principal para a escolha dos receptores para cada aplicação. Sua escolha para VLC deve ser feita se considerando a sensibilidade do sensor utilizado face ao espectro emitido pela fonte de luz, que por sua vez deve considerar o espectro visível humano e o propósito da aplicação dessa iluminação. A Figura 1 mostra o espectro de emissão dos principais LEDs brancos do mercado. Sendo estes utilizados para diferentes

The authors are with Terrestrial Mobility Lab. at the Federal University of Lavras (UFLA), Brazil. During this study, M. R. Santos was supported by a scholarship from CNPq/Brazil. A. Miranda Neto is projects coordinator of 88881.067959/2014-01 and 88881.068069/2014-01 from CAPES/Brazil. Contact the authors: {santos.mrodrigues0}@gmail.com and {daniilo.delima, arthur.miranda}@deg.ufla.br.

aplicações (as curvas mostram que os sensores teriam diferentes respostas à uma mesma intensidade e posição de luz, devido à diferença no espectro emitido).

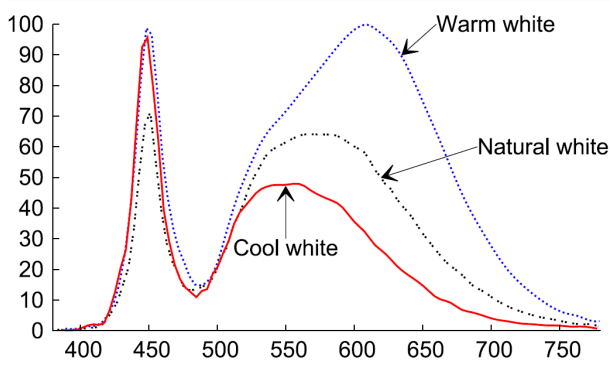


Figura 1. Espectro de emissão de LEDs de três cores: Branco frio (linha contínua), Branco natural (linha tracejada) e Branco quente (linha pontilhada), mais comumente empregados na iluminação artificial. Na figura, a abscissa representa o comprimento de onda eletromagnética emitida (em nanômetros) e a ordenada a potência de radiação normalizada (em porcentagem). (Imagem retirada de [3])

III. POSICIONAMENTO POR MEIO DA LUZ VISÍVEL

São três os principais parâmetros de um sistema de VLP a se considerar para o entendimento do modelo básico: o transmissor, o receptor e o ambiente. Eles estão simplificados na Figura 2, em que está ilustrado o funcionamento básico da camada física. Importante considerar que a luz emitida traça basicamente dois tipos de caminho para alcançar o receptor, um caminho direto (LOS - *Line-of-Sight*), e um caminho indireto (NLOS - *Non-Line-of-Sight*), proveniente dos sinais luminosos refletidos nas paredes ou obstáculos. As dimensões e geometrias do ambiente determinam o modelo para cada um dos sinais recebidos. Entretanto, a influência dos sinais NLOS para sistemas de baixa taxa de transmissão de dados, como os de posicionamento, é desprezível [4]. Neste sistema, a potência do sinal óptico recebida no sensor (P_R) pode ser modelada pela equação 1, que leva em consideração a potência luminosa emitida (P_T), a distância entre transmissor e emissor (d), o padrão de radiação do emissor de luz em função do ângulo de irradiação ($R_E(\phi)$), filtros ópticos ($T(\psi)$) (implementados no hardware do receptor), concentradores ópticos ($G(\psi)$) (lentes), a área física do receptor (A_R), e por fim o ângulo de incidência do sinal luminoso ($\cos(\psi)$) [5].

$$P_R = \frac{P_T}{d^2} R_E(\phi) T(\psi) G(\psi) A_R \cos(\psi). \quad (1)$$

Neste modelo, as funções do campo de visão podem ser sintetizadas em apenas um parâmetro, chamado área efetiva de recepção de sinais ($A_{ef}(\psi)$) (Equação 2), dependente das características do sensor utilizado e da implementação ou não de filtros e concentradores ópticos. Enquanto RE é função do

²O padrão lambertiano é característica intrínseca de um LED de superfície emissora, e tem relação direta com a área efetiva de iluminação do LED. Este padrão modela o comportamento da potência de sinal incidido em função do ângulo ϕ em relação à normal do LED [6].

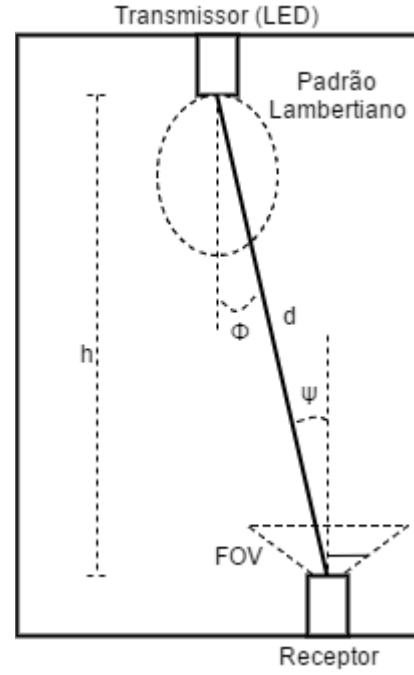


Figura 2. Esquemático básico de sistema de VLP considerando um receptor único, um transmissor LED e os parâmetros espaciais supracitados. A imagem ilustra, também, o padrão Lambertiano de irradiação e o campo de visão de incidência (FOV - *Field of View*).²

padrão lambertiano do LED utilizado no sistema (Equação 3, 4).

$$A_{ef}(\psi) = A_R \cos(\psi) T(\psi) G(\psi). \quad (2)$$

$$R_E(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi). \quad (3)$$

onde m é a ordem lambertiana, dependente do semiângulo de emissão ($\phi_{1/2}$) (parâmetro do LED), definido por: [5], [7]

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\phi_{1/2}))}. \quad (4)$$

O conhecimento do comportamento de tais parâmetros se faz de suma importância, como se observa nos métodos de VLP mais relevantes, encontrados na literatura, utilizarem principalmente a amplitude do sinal recebido como parâmetro principal nos algoritmos de posicionamento, conforme será abordado adiante. Nesse contexto, a Figura 3 ilustra o comportamento da amplitude normalizada do sinal recebido em função da variação de cada parâmetro espacial individualmente.

A. Métodos de Posicionamento

Diferentes técnicas são estudadas para o processamento dos sinais recebidos de diversas fontes de luz visando o cálculo da posição do receptor conhecendo a posição dos emissores, sendo esse receptor um sensor único ou sensor de imagem (composto por uma matriz de sensores de foto-

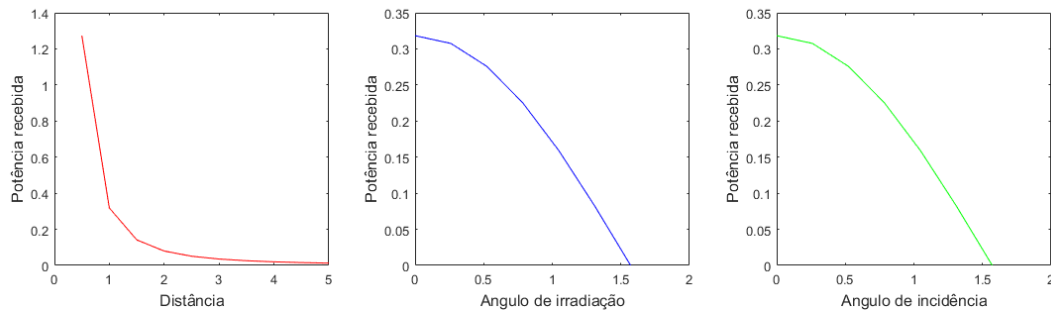


Figura 3. Comportamento da amplitude em função da variação a) da distância (d); b) do ângulo de incidência (ψ); e do ângulo de irradiação (ϕ).

diodos). As quatro principais técnicas³ serão aprofundadas para posterior comparação dos resultados obtidos com sua utilização, sendo elas: Divisão Espacial (SDMA), Divisão Temporal (TDMA), Divisão de Frequências (FDMA), Divisão de Código (CDMA)⁴.

1) *Divisão Espacial*: São classificadas como SDMA as técnicas de posicionamento em que as informações de cada LED são recebidas por partes diferentes do sensor. Ou seja, demandam a utilização de sensores de imagem. Seu princípio de funcionamento consiste na modulação dos LEDs em frequências específicas e aquisição de imagens por meio dos sensores, também em uma dada frequência. Dessa forma, as imagens são processadas para a determinação de sinais luminosos em certas posições e da presença de determinadas frequências. As imagens são decodificadas para se obter a localização dos sinais luminosos. No servidor de processamento deve conter um banco de dados com as coordenadas espaciais relacionadas à frequência emitida por cada LED. Uma vez que os sinais são identificados, algoritmos de localização, como por exemplo Ângulo de Aquisição (AoA - *Angle of Arrival*) determinam a posição do dispositivo receptor [10], [11].

A frequência de amostragem e a capacidade de processamento de imagens dos dispositivos são as principais dificuldades da técnica em questão. Câmeras de visão computacional convencionais variam sua taxa de aquisição de 30 fps a 120 fps, o sendo baixa para a análise das frequências emitidas pelos LEDs. Soluções tais como a utilização de câmeras de alta velocidade, aumento da densidade de emissores de luz por área abrangida, e implementação de lentes especiais são estudadas na literatura, entretanto aumentam significativamente o custo de implementação dessa tecnologia [2], [11], [12].

2) *Divisão Temporal*: Desteante do método supracitado, a divisão por tempo depende da utilização de apenas um fotosensor na recepção do sinal. A técnica se baseia em cada LED enviar um único pulso de sinal sequencialmente para um

dado montante de LEDs que cobrem a mesma área. Cada pulso é enviado com a mesma largura. Dessa forma, o receptor, após um dado período de tempo, adquire sinais de todos os LEDs da área coberta e assimila a potência do sinal recebido de cada transmissor pela posição do pulso no período de tempo. É importante ressaltar que os demais LEDs do painel, enquanto não estão transmitindo seu sinal, permanecem desligados [13], ao menos que seja aplicada uma detecção de colisões no sistema [14].

A utilização dessa técnica acarreta algumas desvantagens ao sistema a exemplo a limitação na taxa de transmissão de dados devido à cada transmissor ser capaz de enviar os dados em um pequeno período de tempo, o que causa uma baixa taxa de atualização no posicionamento de um receptor em movimento. Outra desvantagem relevante é a necessidade de sincronismo do sistema, o que acarreta maior custo de implementação e limitação de acessibilidade dos dispositivos.

Na literatura são encontradas implementações por divisão temporal que baseia o processamento dos sinais recebidos principalmente em RSS ou em tempo de chegada (ToA - *Time of Arrival*). Simulações⁵ estimam que o segundo método possa atingir precisões maiores que a maioria dos sistemas de VLP existentes. Entretanto este requer que o receptor porte de um temporizador altamente preciso, devido à pequena distância entre os dispositivos transmissores e receptores face à velocidade da luz [2], [13].

3) *Divisão de Frequência*: Ainda sobre a perspectiva de utilização de um receptor único, visando alternativas que eliminem a necessidade de sincronização dos transmissores, a tecnologia de FDMA consiste na associação de diferentes frequências a cada LED e processamento dos sinais no domínio da frequência, com a aplicação de FFT no sinal recebido, e cada transmissor pode ser distinguido pelo espectro transmitido. Devido a não sincronização dos dispositivos, o processamento de sinais tem que ser feito por análise de potência do sinal óptico. A independência de sincronização, somada à baixa complexidade necessária no circuito transmissor tornam esse um método com baixo custo de implementação⁶.

Para o entendimento das limitações da técnica é importante

³Na literatura mais recente [2], encontra-se essa divisão pela tecnologia de comunicação do canal óptico; diferindo-se de produções anteriores que classificavam pelo método de processamento de sinais [4].

⁴Aqui considera-se apenas as tecnologias de acesso múltiplo, desconsiderando o método de proximidade, o qual consiste na detecção de uma série de pontos de referência em uma rede e o posicionamento por detecção desses pontos, devido a sua limitação de precisão na resolução da rede de transmissores [8], [9], o que inviabiliza a análise do método para a aplicação em estudo. As siglas são padronizadas com base em [2], sendo tradução para Space Division Multiple Access, Time Division Multiple Access, Frequency Division Multiple Access e CodeDivisionMultiple Access, respectivamente.

⁵Simulações no software MATLAB que forneceram resultado de 3,9 cm de erro máximo em um ambiente de 5x5x3 m (Dimensionamento médio de uma sala residencial).

⁶Apesar da desvantagem pela perda de eficiência máxima dos dispositivos de LED com a utilização de controladores analógicos.

retomar a equação 1, levando em conta que o processamento dos sinais é feito por meio da potência do sinal óptico. A obtenção de informação de distância em função da potência do sinal de dada frequência, ou seja, do sinal associado a um LED, é dependente do ângulo de incidência e do ângulo de irradiação, que em um sistema prático dependem da posição do transmissor e do receptor, e são parâmetros não fixos. As formas encontradas na literatura para minimizar possíveis erros gerados na relação desses parâmetros é a introdução de um fator de correção encontrando os ângulos ϕ e ψ , ou ainda assumindo um sistema onde o transmissor e receptor estão sempre paralelos e em altura fixa, o que simplifica a equação em:

$$d = \sqrt[4]{\frac{P_T h^2 A_R}{P_R \pi}} \quad (5)$$

4) *Divisão de Código*: Tecnologia que se baseia na transmissão de uma única sequência de informações codificadas (digitais) por cada LED. Apesar da transmissão de dados, o sistema independe de sincronização, devido à característica do receptor de conhecer todos os códigos utilizados em determinada área, obtendo-se informações de cada LED. Comumente, essa tecnologia se associa, também, à utilização da potência óptica no algoritmo de posicionamento. No entanto na utilização dessa técnica em sistemas de CDMA, atrasos aleatórios entre os sinais geram grande montante de interferência de acesso múltiplo que influenciam no erro de posicionamento.

Um importante ponto a se considerar nas técnicas de CDMA é a influência negativa na função de iluminação dependendo do padrão de codificação utilizado. A maneira de contornar é a padronização dos códigos de comunicação para métodos que definem a potência média de saída nos LEDs, tais como códigos de comunicação por rádio frequência (RF - *Radio Frequency*), que tem uma potência de saída média de 50% [2].

B. O Estado da Arte

No contexto desta tecnologia em ascensão, diversos métodos têm sido estudados visando à viabilização e aplicação da VLP⁷. Frente a este cenário, resultados variados demonstram a evolução atual permitindo entender as perspectivas deste campo de estudo. A Tabela I, anexada ao final deste texto, expõe os resultados mais relevantes encontrados na literatura, em função do método de posicionamento utilizado, a área abrangida pelo sistema, o erro associado ao posicionamento, e as principais características individuais de cada um.

IV. APLICAÇÕES PARA A MOBILIDADE AUTÔNOMA

Através do atual desenvolvimento no campo da mobilidade autônoma e ao crescente nível de automação dos veículos que compõe o mercado, algumas limitações ainda são inerentes aos sistemas de inteligência veicular. No âmbito do posicionamento global, parâmetro fundamental para todo nível de automação veicular, a limitação se encontra nos sistemas de posicionamento global tradicionais (GPS), os quais não

fornece precisão suficiente para garantir a segurança, e tem seu funcionamento limitado em áreas urbanas [28].

Esse cenário converge na busca por métodos alternativos que viabilizem a localização precisa nesses ambientes. O VLP se mostra como solução atrativa, visto a junção de um posicionamento local relativamente preciso, em grande parte dos resultados para posicionamento em grandes áreas⁸, e o baixo custo de implementação, face à possibilidade de utilização da própria infraestrutura de iluminação pública.

A limitação primordial de tal aplicação é referente à ampla gama de interferência nos sistemas, devido a se colocarem em ambiente aberto, sujeito à luz solar e outras fontes de iluminação artificial. Esse se mostra como grande desafio a ser superado na literatura⁹. Outro fator relevante à aplicabilidade da tecnologia rememora o fato de veículos também possuam dispositivos luminosos, possibilitando a comunicação não apenas no sentido infraestrutura para veículos (I2V), mas também de veículos para infraestrutura (V2I) e veículos para veículos (V2V). Ainda é importante ressaltar a acessibilidade urbana atrelada à aplicação de VLC sendo disponibilizada na iluminação pública, contribuindo, em análise ampla, ao desenvolvimento das cidades inteligentes [3], [31].

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo por base os resultados catalogados no item III-B, observa-se o potencial das tecnologias ascendentes de posicionamento com base em VLC. Conforme supracitado, o emprego destas nos campos da mobilidade urbana. Resultados mais promissores demonstram precisões de 0,1 a 1 metro para áreas aplicáveis ao ambiente urbano, atrelando robustez e baixo custo em sua implementação. Nesse trabalho, conclui-se que a alternativa proposta se demonstra como alternativa plausível e a ser amplamente estudada para contribuição no desenvolvimento de veículos inteligentes.

Como perspectiva futura, pretende-se validar os métodos estudados para VLP por meio da obtenção de resultados próprios, com foco no estudo de FDMA, e a implementação em médio-longo prazo de testes da tecnologia para veículos inteligentes.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Vieira, R. Costa, A. Pereira, and P. Fonseca, "A validation framework for visible light positioning in mobile robotics," in *2016 Int. Conf. Autonomous Robot Syst. Competitions (ICARSC)*, May 2016, pp. 47–52.
- [2] S. D. Lausnay, L. D. Strycker, J. P. Goemaere, B. Nauwelaers, and N. Stevens, "A survey on multiple access visible light positioning," in *2016 IEEE Int. Conf. Emerging Technol. Innovative Bus. Pract. Transfor. Soc. (EmergiTech)*, Aug 2016, pp. 38–42.
- [3] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, Fourth-quarter 2015.
- [4] K. Yan, H. Zhou, H. Xiao, and X. Zhang, "Current status of indoor positioning system based on visible light," in *Control, Automation Syst. (ICCAS), 2015 15th Int. Conf. IEEE*, 2015, pp. 565–569.

⁸Com grandes áreas, entende-se de tamanho suficiente para o posicionamento de um veículo baseado na utilização de lâmpadas de iluminação pública.

⁹Neste ponto, justificam-se as principais vantagens da aplicação de técnicas de FDMA, devido à sua robustez frente a interferências externas.

⁷Principalmente para o posicionamento em ambientes internos e para a mobilidade urbana.

- [5] S. De Lausnay, L. De Strycker, J.-P. Goemaere, B. Nauwelaers, and N. Stevens, "A test bench for a vlp system using cdma as multiple access technology," in *Transparent Opt. Networks (ICTON), 2015 17th Int. Conf.* IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [6] G. Keiser, *Comunicações por Fibras Ópticas-4*. AMGH Editora, 2014.
- [7] H.-S. Kim, D.-R. Kim, S.-H. Yang, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "An indoor visible light communication positioning system using a rf carrier allocation technique," *J. Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 134–144, 2013.
- [8] W. Chunyue, W. Lang, C. Xuefen, L. Shuangxing, S. Wenxiao, and D. Jing, "The research of indoor positioning based on visible light communication," *China Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 85–92, 2015.
- [9] Y. Lee, S. Baang, J. Park, Z. Zhou, and M. Kavehrad, "Hybrid positioning with lighting leds and zigbee multihop wireless network," in *SPIE OPTO*. International Society for Optics and Photonics, 2012, pp. 82 820L–82 820L.
- [10] M. S. Rahman, M. M. Haque, and K.-D. Kim, "High precision indoor positioning using lighting led and image sensor," in *Comput. Inf. Technol. (ICCIT), 2011 14th Int. Conf.* IEEE, 2011, pp. 309–314.
- [11] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, and P. Dutta, "Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light," in *Proc. 20th Annual Int. Conf. Mobile Comput. Netw.* ACM, 2014, pp. 447–458.
- [12] Y. Nakazawa, H. Makino, K. Nishimori, D. Wakatsuki, and H. Komagata, "Indoor positioning using a high-speed, fish-eye lens-equipped camera in visible light communication," in *Indoor Positioning Indoor Nav. (IPIN), 2013 Int. Conf.* IEEE, 2013, pp. 1–8.
- [13] T.-H. Do and M. Yoo, "Tdoa-based indoor positioning using visible light," *Photonic Netw. Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 80–88, 2014.
- [14] L. Li, P. Hu, C. Peng, G. Shen, and F. Zhao, "Epsilon: A visible light based positioning system," in *NSDI*, 2014, pp. 331–343.
- [15] U. Nadeem, N. Hassan, M. Pasha, and C. Yuen, "Highly accurate 3d wireless indoor positioning system using white led lights," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 11, pp. 828–830, 2014.
- [16] S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Three-dimensional visible light indoor localization using aoa and rss with multiple optical receivers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 14, pp. 2480–2485, 2014.
- [17] A. Sahin, Y. S. Eroglu, I. Guvenc, N. Pala, and M. Yuksel, "Accuracy of aoa-based and rss-based 3d localization for visible light communications," in *Veh. Technol. Conf. (VTC Fall), 2015 IEEE 82nd.* IEEE, 2015, pp. 1–5.
- [18] K. Qiu, F. Zhang, and M. Liu, "Visible light communication-based indoor localization using gaussian process," in *Int. Robots Syst. (IROS), 2015 IEEE/RSJ Int. Conf.* IEEE, 2015, pp. 3125–3130.
- [19] P. Luo, M. Zhang, X. Zhang, G. Cai, D. Han, and Q. Li, "An indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique," in *Opt. Wirel. Commun. (IWOW), 2013 2nd Int. Workshop.* IEEE, 2013, pp. 25–29.
- [20] G. Kail, P. Maechler, N. Preys, and A. Burg, "Robust asynchronous indoor localization using led lighting," in *Acoust., Speech, Signal Process. (ICASSP), 2014 IEEE Int. Conf.* IEEE, 2014, pp. 1866–1870.
- [21] K. Y. Yi, D. Y. Kim, and K. M. Yi, "Development of a localization system based on vlc technique for an indoor environment," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 10, pp. 436–442, 2015.
- [22] S.-Y. Jung, S. R. Lee, and C.-S. Park, "Indoor location awareness based on received signal strength ratio and time division multiplexing using light-emitting diode light," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 1, pp. 016 106–016 106, 2014.
- [23] S. Yamaguchi, V. V. Mai, T. C. Thang, and A. T. Pham, "Design and performance evaluation of vlc indoor positioning system using optical orthogonal codes," in *Commun. Electron. (ICCE), 2014 IEEE 15th Int. Conf.* IEEE, 2014, pp. 54–59.
- [24] M.-g. Moon and S.-i. Choi, "Indoor position estimation using image sensor based on vlc," in *Adv. Technol. Commun. (ATC), 2014 Int. Conf.* IEEE, 2014, pp. 11–14.
- [25] M. Yasir, S.-W. Ho, and B. N. Vellambi, "Indoor positioning system using visible light and accelerometer," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 19, pp. 3306–3316, 2014.
- [26] W. Zhang, M. S. Chowdhury, and M. Kavehrad, "Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 4, pp. 045 105–045 105, 2014.
- [27] X. Zhang, J. Duan, Y. Fu, and A. Shi, "Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on received signal strength indicator," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 21, pp. 3578–3584, 2014.
- [28] B. W. Kim and S.-Y. Jung, "Vehicle positioning scheme using v2v and v2i visible light communications," in *Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd.* IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [29] J. Hu, C. Gong, and Z. Xu, "Demonstration of a robot controlling and positioning system based on visible light," in *Wirel. Commun. Signal Process. (WCSP), 2016 8th Int. Conf.* IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [30] Y. See and N. M. Noor, "Investigation of indoor positioning system using visible light communication," in *Region 10 Conf. (TENCON), 2016 IEEE.* IEEE, 2016, pp. 186–189.
- [31] T.-H. Do and M. Yoo, "Visible light communication based vehicle positioning using a rolling shutter cmos sensor," in *Ubiquitous Future Networks (ICUFN), 2016 8th Int. Conf.* IEEE, 2016, pp. 48–50.



Mateus Rodrigues Santos is an undergraduate student of Automation and Control Engineering at Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, Brazil. He is a member of the Terrestrial Mobility Laboratory (LMT), UFLA, since 2016. Currently, he is in an introduction to scientific research program with a scholarship from CNPq/Brazil.



Danilo Alves de Lima received the B.S. degree in Control and Automation Engineering and M.S. degree in Electrical Engineering from Federal University of Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brazil, in 2008 and 2010, and a Ph.D. degree in Information and Systems Technologies from the University of Technology of Compiègne (UTC), Compiègne, France, in 2015. Currently, he is an Associate Professor at the Engineering Department of the Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, Brazil.

He is a member of the Terrestrial Mobility Laboratory (LMT), UFLA, since 2015. He also worked with the Group for Research and Development of Autonomous Vehicles (PDVA), UFMG, and Heudiasyc UMR 7253, a common research laboratory between UTC and CNRS. His research interests include robotic navigation, intelligent vehicles development, and computer vision.



Arthur de Miranda Neto received the B.S. degree in computer science - data processing - (1998), M.S. degree in mechanical engineering (2007) from State University of Campinas (UNICAMP), Campinas, Brazil, and a Ph.D. degree in information and systems technologies (2011) from the University of Technology of Compiègne (UTC), Compiègne, France, and in mechanical engineering from the UNICAMP, Brazil.

He was Officer (systems analyst) of the Brazilian Army between 1997 and 2005. He was Visiting Professor at the UNICAMP between 2012 and 2014. Since 2014, he is an Associate Professor in the Engineering Department at the Federal University of Lavras (UFLA) and head of the Terrestrial Mobility Laboratory (LMT). His research interests are in the field of robotic and mechatronic systems, more precisely in the area of automated driving systems.

Tabela I
O ESTADO DA ARTE

Pesquisador	Técnica de VLP	Alcance de operação (m)	Precisão Obtida	Características (método de medição, sincronismo, custo, características individuais)
[15]	TDMA	5x5x3	1mm	TDoA, sistema de transmissão sincronizado, baixo custo de implementação, resultados de simulação, posicionamento tridimensional
[5]	CDMA	3x3x2	0.7 m	RSSI, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados experimentais, o acesso múltiplo aumenta o erro de posicionamento.
[16]	CDMA	2 x 2 x 2.5	2.3cm	AoA e RSSI, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados de simulação, utilização de um único transmissor e múltiplos receptores, posicionamento tridimensional
[11]	SDMA	0.71 x 0.73	0.1 m	AoA, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados experimentais, capacidade de estimar orientação do receptor
[7]	FDMA	1 x 1 x 0.6	0.2 cm 2.4 cm	RSSI, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados experimentais.
[14]	FDMA	20 x 20 x 3	<0.4 m	RSSI, transmissão de dados não sincronizada, baixo custo de implementação, resultados de simulação
[17]	TDMA	3 x 5 x 4	< 1 m	AoA e RSS, sistema previsto em modelo matemático, sem previsão de implementação
[18]	SDMA	4.7 x 8.6	0.56 m	Inferência Gaussiana e Bayesiana, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados experimentais,
[19]	FDMA	2x2x2	18mm	RSSI, sistema de transmissão não sincronizado, baixo custo de implementação, resultados de simulação, sistema com transmissão de dados em alta frequência dentro da baixa frequência utilizada para o posicionamento. Constatação de diminuição do erro de posicionamento em dez vezes a cada 10 dB aumentados na relação sinal/ruído.
[13]	TDMA	5x5x3	3,9 cm	TDoA, sistema de transmissão sincronizado, alto custo de implementação, resultados de simulação usando MATLAB
[10]	SDMA	1,8x1,8x3,5	10 cm	Processamento de imagem, sistema não sincronizado, sem parâmetro de custo, resultados de simulações, o sistema tem suas vantagens na simplicidade e independência de referências angulares.
[20]	CDMA	30x30x4	0,81m	Inferência Bayesiana, sem necessidade de sincronização, baixo custo de implementação, resultados de simulação com MATLAB, considera funcionamento com influência de NLOS
[21]	TDMA	1,2x1,2x1,7	3cm	RSSI, sistema sincronizado, baixo custo de implementação, utilização de bit stuffing para otimização do sistema de VLC, aplicação em robótica móvel
[22]	TDMA	1,0x1,0x1,3	3,24cm	RSSI, sistema sincronizado, alto custo, necessário que a altura do receptor seja fixa e conhecida
[23]	CDMA	6x6x0,4	8cm	OOC, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados dados por simulação e modelo matemático, combinação de transmissão de dados para cobertura de áreas maiores
[24]	SDMA	1,8x1,8x3,5	0,09x0,08x0,44 cm	Processamento de imagem, sistema não sincronizado, sem parâmetro de custo, resultados por simulação, posicionamento tri dimensional.
[25]	TDMA	5x3x3	25cm	RSSI, sistema sincronizado, baixo custo, resultados experimentais, sensoriamento híbrido com o uso de sensores inerciais, posicionamento tri dimensional
[26]	TDMA	6x6x4	11,2cm	RSSI e ToA, sistema não sincronizado com detector de colisão, baixo custo, receptor em altura fixa e conhecida, resultados de simulação
[12]	SDMA	7,5x5,4x3	10cm	Processamento de imagem, sistema sincronizado, alto custo, resultados experimentais, utilização de lente olho de peixe para melhoria do posicionamento por abranger mais transmissores no FOV de recepção.
[27]	FDMA	2,2x2,2x3	-	RSSI, sistema não sincronizado, baixo custo, teste da influência de diversos parâmetros do modelo de RSSI para VLP no erro de posicionamento por meio de simulações.
[28]	SDMA	20x6x5	1m	Processamento de imagem, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados de simulação, aplicação para mobilidade terrestre.
[29]	TDMA	2,5x2,5x2	10cm	RSSI, sistema sincronizado, baixo custo, resultados experimentais, aplicação para robótica móvel.
[30]	FDMA	0,95x0,9x0,6	40cm	RSSI, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados experimentais, sistema de baixa complexidade.
[1]	CDMA	20x20x5	<60cm	Estimação de parâmetros, sistema não sincronizado, baixo custo, resultados de simulação com transmissores espalhados em forma de domo.