

ƯỚC LƯỢNG CHUYỂN ĐỘNG CỦA XE TỰ HÀNH DỰA TRÊN KỸ THUẬT BUNDLE ADJUSTMENT DÙNG CAMERA ĐA HƯỚNG

Hoàng Văn Dũng

Tóm tắt. Bài báo trình bày kỹ thuật ước lượng chuyển động của xe tự hành sử dụng camera đa hướng (omnidirectional camera) dựa trên kỹ thuật điều chỉnh chùm (Bundle Adjustment- BA). Vấn đề kinh điển của bài toán ước lượng chuyển động là lỗi sẽ bị tích lũy theo thời gian. Một trong những ưu điểm của camera đa hướng là cho phép quan sát các đối tượng ở tất cả các hướng, các đối tượng sẽ được theo dõi (tracking) khi xe chuyển động trong thời gian dài và góc quay lớn. Phương pháp ước lượng chuyển động dựa trên kỹ thuật BA sử dụng camera đa hướng được nghiên cứu để giảm thiểu lỗi trong mỗi khoảng chuyển động cục bộ nhằm nâng cao độ chính xác ước lượng vị trí của xe trong quá trình tự hành. Trong phạm vi nghiên cứu này, lỗi ước lượng chuyển động sẽ được xem xét trên khía cạnh giảm thiểu sai số ước lượng chuyển động quay của xe. Tiêu chuẩn đánh giá lỗi dựa trên góc lệch sai số giữa tia thu được từ đối tượng quan sát trong môi trường đến camera tại các vị trí và tia từ đối tượng ước lượng (dựa trên ước lượng chuyển động của xe) đến camera. Mô hình nghiên cứu được thực nghiệm trên hệ thống xe điện gắn các thiết bị gồm camera đa hướng, camera truyền thống (perspective camera), LRF (Laser Range Finder) và thiết bị thu tín hiệu GPS (Global Positioning System). Thí nghiệm được tiến hành tại những địa hình khác nhau trong môi trường chuyển động ngoài trời. Để so sánh đối chiếu, vị trí (quỹ đạo) ước lượng của xe được so sánh với vị trí tuyệt đối thu từ thiết bị GPS, IMU (Inertial Measurement Unit) và đối chiếu với vị trí trên bản đồ vệ tinh của Google Maps.

Từ khóa: Bundle adjustment, structure from motion, visual odometry.

1. MỞ ĐẦU

Ngày nay, các hệ thống điều hướng tự động đang phát triển và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu và công nghiệp như robot/xe tự hành, các hệ thống giao thông thông minh, . . . Tác vụ điều hướng xe tự hành đã trở thành một lĩnh vực hết sức quan trọng, liên quan đến nhiều ứng dụng khác nhau như lập lịch lộ trình, ước lượng vị trí- định vị xe trong quá trình chuyển động, hiểu biết môi trường xung quanh, . . . Liên quan đến vấn đề này, nhiều nhà khoa học đang tập trung nghiên cứu các phương pháp để nâng cao chất lượng điều hướng của robot/xe tự hành trong môi trường trong nhà cũng như ngoài trời [1-4]. Trong lĩnh vực định vị đối tượng chuyển động ngoài trời, một trong những thiết bị được sử dụng khá phổ biến là thiết bị thu tín hiệu GPS. Tuy nhiên, tại những vị trí bị che khuất như khu vực có nhiều nhà cao tầng, trong đường hầm thì tín hiệu từ các vệ tinh sẽ bị mất hoặc bị sai lệch lớn so với vị trí thực tế. Vị trí định vị từ thiết bị GPS có thể chấp nhận được khi xem xét trong phạm vi toàn cục, nhưng khi xem xét trong phạm vi cục bộ, chi tiết thì độ chính xác tương đối thấp. Giải pháp để nâng cao độ chính xác là kết hợp GPS với các thiết bị khác như WO (Wheel Odometer), IMU, LRF. Thiết bị WO có thể cải thiện được kết quả ước lượng nhưng nó thường hoạt động không chính xác trong địa hình mà bánh xe dễ bị trượt hoặc trong điều kiện mặt đường gồ ghề, lổm chổm. Thiết bị IMU cho phép tính gia

tốc và hướng chuyển động, nhưng hạn chế của thiết bị này là gặp phải là lỗi tích lũy theo thời gian khi xe chuyển động với lộ trình dài, dữ liệu từ nó không dùng để điều chỉnh được sai số được. Bên cạnh đó, thiết bị LRF cũng là một lựa chọn tốt trong lĩnh vực này. Tuy nhiên, tín hiệu của LRF có thể yếu hoặc mất tín hiệu trong môi trường chuyển động mà các đối tượng ở xa ngoài phạm vi hoạt động của thiết bị hoặc đối tượng có độ phản xạ kém. Để khắc phục những vấn đề trên, camera đa hướng được đề xuất sử dụng để giảm thiểu lỗi ước lượng của chuyển động quay dựa trên kỹ thuật BA. Ưu điểm của camera đa hướng là góc nhìn rộng (360°). Nó cho phép quan sát và tracking được các đối tượng trong khoảng chuyển động dài và góc quay lớn. Điều này thích hợp để hiệu chỉnh sai số ước lượng chuyển động quay cục bộ nhằm giảm thiểu lỗi tích lũy toàn cục.

2. NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

Trong lĩnh vực định vị và xây dựng bản đồ chuyển động ứng dụng trong tự động hóa, việc kết hợp camera và các thiết bị điện tử khác đang được nghiên cứu và ứng dụng như một giải pháp để giải quyết vấn đề lỗi tích lũy trong quá trình ước lượng chuyển động của xe/robot. Thiết bị camera truyền thống đã được một số nhóm nghiên cứu ứng dụng, ví dụ như các nhóm [5, 6] sử dụng đơn camera, [7, 8] sử dụng nhiều camera. Vì những hạn chế về phạm vi quan sát của camera truyền thống, một số nhóm nghiên cứu đã tiếp cận theo hướng khác đó là sử dụng camera có phạm vi quan sát rộng, như camera mắt cá (fisheye camera), camera đa hướng (omnidirectional camera) [9-11]. Chi tiết về một số mô hình camera đa hướng được trình bày chi tiết trong tài liệu [12]. Kỹ thuật cơ bản của ước lượng chuyển động dựa vào camera là xác định đặc trưng tương ứng trong ảnh liên tiếp và dùng các ràng buộc hình học epipolar để ước lượng chuyển động [7, 13]. Một trong những khó khăn của vấn đề xác định và matching đặc trưng tương ứng giữa các ảnh đó là sai số thường lớn. Nguyên nhân là do độ phân giải ảnh thấp, độ méo, độ tương phản của ảnh sáng và bị nhiễu khi thu nhận ảnh. Đây cũng chính là trở ngại lớn cho các phương pháp visual odometry (VO), simultaneous localization and mapping (SLAM). Bài báo [14] trình bày tóm tắt, đánh giá các nghiên cứu hiện tại về vấn đề định vị, ước lượng chuyển động sử dụng các thiết bị camera ứng dụng trong xe/robot thông minh. Các tác giả đã chỉ ra rằng một trong những kỹ thuật hữu hiệu trong lĩnh vực này là sử dụng phương pháp Kalman Filter (KF), nó đã được nghiên cứu áp dụng và kết quả được cải tiến nhất định.

Những năm gần đây, các phương pháp kết hợp nhiều loại thiết bị khác nhau đang được đề xuất nghiên cứu để giải quyết những hạn chế trên, ví dụ như [15, 16]. Phương pháp sử dụng thiết bị 2D LRF quay để xây dựng bản đồ mô hình không gian 3D môi trường chuyển động áp dụng trong địa hình phẳng được đề xuất bởi các tác giả trong [16]. Trong hệ thống sử dụng đa thiết bị, các thiết bị GPS được dùng để định vị vị trí toàn cục, các thiết bị điện tử khác như IMU, VO được dùng để ước lượng chuyển động cục bộ. Các phương pháp này thường cho kết quả chấp

nhận được. Tuy nhiên, tín hiệu GPS thường không cho kết quả tốt khi xe di chuyển vào những vùng bị các đối tượng che khuất. Một số tác giả, ví dụ [4, 17, 18], đã đề xuất các phương pháp sử dụng camera kết hợp với các loại thiết bị khác để khắc phục những hạn chế đó và chất lượng được cải thiện một cách đáng kể. Bài báo [19] trình bày phương pháp định vị và xây dựng bản đồ dựa trên việc kết hợp đa thiết bị gồm LRF, gyroscope, encoder và đã cải thiện được một số hạn chế của GPS.

Dựa vào những phân tích ở trên, chúng tôi đã nghiên cứu và đề xuất sử dụng phương pháp ước lượng chuyển động của xe bằng cách kết hợp sử dụng camera đa hướng và LRF nhằm giảm thiểu lỗi tích lũy dựa trên kỹ thuật BA để hiệu chỉnh lỗi phát sinh trong phạm vi cục bộ.

3. RÀNG BUỘC EPIPOLAR TRONG ƯỚC LƯỢNG CHUYỂN ĐỘNG

Hệ thống VO được xử lý dựa trên các ràng buộc hình học giữa các ảnh tuần tự để xác định vị trí và hướng của camera. Trong bài báo này, ràng buộc hình học được phân tích trực tiếp dựa trên ràng buộc hình học epipolar sử dụng phương pháp ma trận essential để phân tích mối quan hệ giữa các ảnh. Ràng buộc hình học của camera tại hai vị trí khác nhau được mô tả bởi biểu thức:

$$p'^T E p = 0 \quad (1)$$

Trong đó: p' và p là hai keypoint tương ứng từ hai vị trí camera; E là ma trận essential, chứa 2 thành phần chuyển động là chuyển động quay và chuyển động tịnh tiến. Ma trận essential được biểu diễn bởi $E=[T]_{\times}R$ với T là vector chuyển động tịnh tiến và ma trận quay R là tích của ba phép quay thành phần (ví dụ $R=R_Y R_Z R_X$). Cần lưu ý rằng, phép nhân ma trận các chuyển động quay thành phần theo trục X, Y, Z trong hệ tọa độ $OXYZ$ là không giao hoán. Ma trận quay R được biểu diễn bởi:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \sin\beta\sin\varphi - \sin\alpha\cos\beta\cos\varphi & \sin\beta\cos\varphi + \sin\alpha\cos\beta\sin\varphi \\ \sin\alpha & \cos\alpha\cos\varphi & -\cos\alpha\sin\varphi \\ -\cos\alpha\sin\beta & \cos\beta\sin\varphi + \sin\alpha\sin\beta\cos\varphi & \cos\beta\cos\varphi - \sin\alpha\sin\beta\sin\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

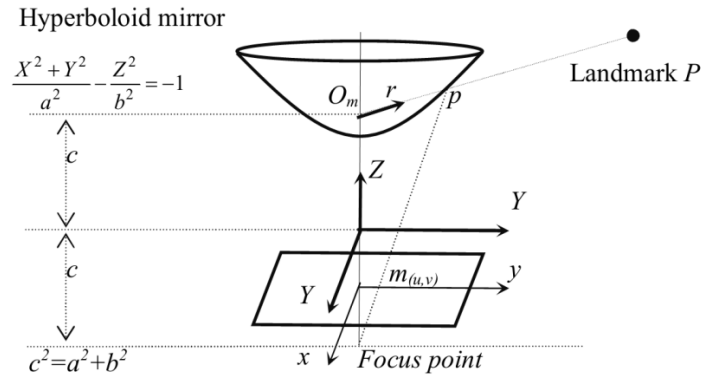
Trong trường hợp ảnh đa hướng (omnidirectional image), các điểm ảnh cần phải được biến đổi về dạng mô hình cầu để áp dụng trực tiếp ràng buộc hình học epipolar. Các keypoints tương ứng trong hai ảnh tuần tự được nhận dạng và matching để ước lượng sự biến đổi giữa chúng. Có nhiều phương pháp khác nhau để biểu diễn keypoint được nghiên cứu trong thời gian gần đây, ví dụ như SIFT, SURF. Trong thực nghiệm này, phương pháp biểu diễn đặc trưng SIFT [20] được dùng để nhận dạng và matching các keypoint. Một điểm trong không gian ba chiều P được chiếu vào mặt phẳng ảnh trên camera tại hai vị trí được minh họa trong Hình 2(a).

Phương pháp trong bài báo [21] được dùng để biết đổi điểm trong ảnh đa hướng thành điểm trong mô hình cầu, như minh họa Hình 1. Tia r từ tâm của gương đến một điểm trong

không gian được tính dựa vào điểm trong ảnh đa hướng m . Công thức biến đổi điểm ảnh (u, v) thành tia r được mô tả như sau:

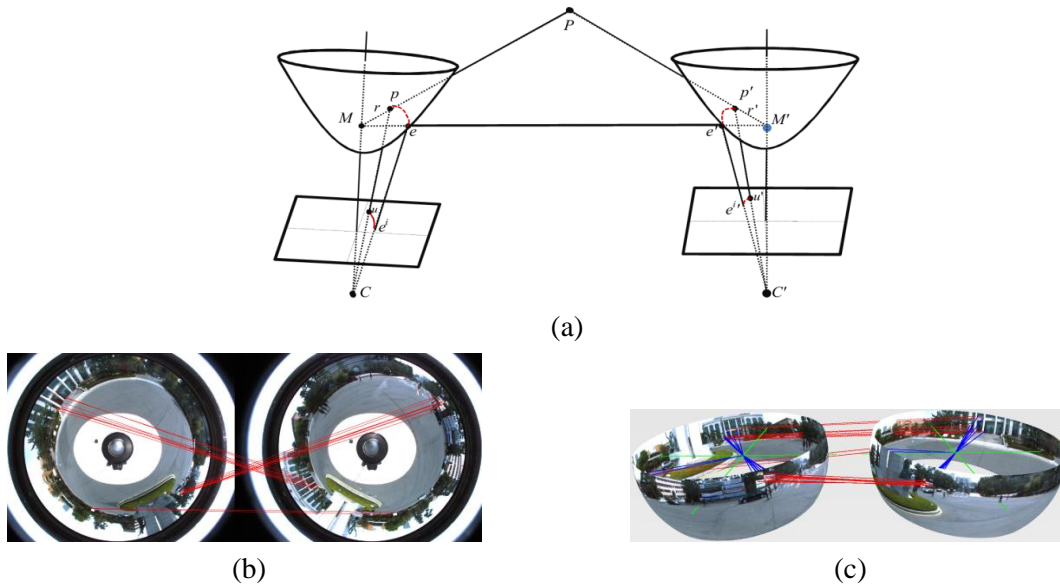
$$r = [su, sv, sf - 2c]^T \quad (3)$$

với $s = a^2 \left(fc + b\sqrt{u^2 + v^2 + f^2} \right) / \left(a^2 + f^2 - b^2(u^2 + v^2) \right)$



Hình 1. Mô hình của camera đa hướng.

Điểm $m(u, v)$ được xác định từ điểm ảnh (x, y) , bằng cách biến đổi nó từ điểm cơ sở (u_0, v_0) trong ảnh đa hướng. Các tham số của gương bao gồm a, b (với $c^2 = a^2 + b^2$) và f là chiều dài tiêu cự của camera.



Hình 2. Ràng buộc hình học giữa hai ảnh: (a) ràng buộc epipolar trong mô hình camera đa hướng; (b) các cặp điểm tương ứng giữa hai ảnh đa hướng được tracking với chuyển động quay lớn; (c) các cặp điểm tương ứng được thể hiện trong mô hình cầu.

4. GIẢM THIỂU LỖI DỰA TRÊN KỸ THUẬT BA

Ước lượng chuyển động của xe dựa trên ảnh tuần tự thu được trong quá trình xe chuyển động. Thông thường sai số phát sinh do sai số thiết bị đo, sai số tính toán,... Kết quả chuyển động

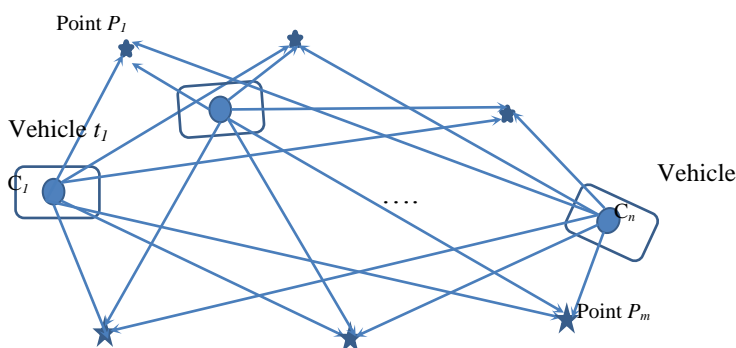
toàn cục được hiệu chỉnh dựa vào tối thiểu hóa ước lượng lỗi cục bộ. Như đã đề cập ở phần trên, ưu điểm của camera đa hướng là khả năng tracking đối tượng khi chuyển động quay lớn và khoảng cách dài. Điều này được tận dụng để giảm bớt lỗi ước lượng trong quá trình xử lý. Kỹ thuật BA được xử lý dựa trên tập đám mây điểm (point cloud) sử dụng trong lý thuyết đa khung nhìn (multi-view) để ước lượng các vị trí camera. Trong bài toán này, kỹ thuật BA được áp dụng để kết hợp dữ liệu đã xử lý với các ảnh mới thu nhận theo thời gian chuyển động để cập nhật lại kết quả ước lượng trước đó. Kỹ thuật này được áp dụng trong mỗi khoảng chuyển động cục bộ, sao cho có ít nhất m điểm keypoint được tracking trên tất cả các ảnh trong khoảng chuyển động cục bộ đó. Trong thực nghiệm này, ngưỡng m được thiết lập là 12 điểm keypoint, dựa trên kết quả thử nghiệm nhiều lần để chọn ra giá trị tham số phù hợp nhất.

Giả sử ta có một tập gồm m điểm keypoint trong không gian tại các vị trí ước lượng được $\hat{P} = \{\hat{P}_i | i=1..m\}$, tập m điểm này đều được quan sát tại tất cả n vị trí của camera (ước lượng). Giả sử ta có tập các tia từ tâm của camera đến m điểm keypoint trong không gian tại n vị trí của camera, ký hiệu là $r = \{r_{ij} | i=1..m, j=1..n\}$. Ma trận chiếu của camera tại các vị trí j^{th} được ký hiệu là H_j . Như vậy, mục tiêu của BA là tối thiểu hóa tổng tất cả các sai số của phép chiếu các điểm keypoint đến camera giữa vị trí thực tế và vị trí ước lượng.

$$\min_{\hat{H}_j, \hat{P}_i} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m A(\text{Norm}(\hat{H}_j \hat{P}_i), r_{ij})^2 \quad (4)$$

Với $A(\cdot)$ là góc giữa 2 tia, $\text{Norm}(\cdot)$ là hàm chuẩn hóa.

Tiêu chuẩn đánh giá sai số là góc lệch giữa tia chiếu từ điểm keypoint ước lượng được và tia thu được từ keypoint thực tế đến tâm của camera tại vị trí thu nhận ảnh. Trong điều kiện lý tưởng thì hai tia này sẽ trùng nhau và do đó độ lệch sẽ bằng không. Nhưng thực tế vì sai số của camera, độ phân giải và độ chính xác của thuật toán matching nên luôn tồn tại sai số.



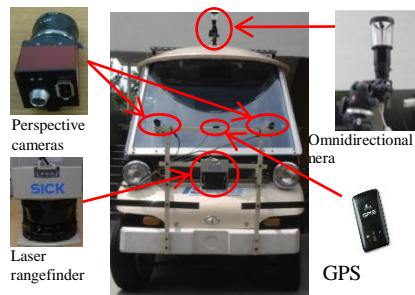
Hình 3. Camera đa hướng có thể tracking được đối tượng trong khoảng chuyển động dài và góc quay lớn.

Vấn đề ở đây là làm sao tối thiểu hóa tổng giá trị của độ lệch giữa tập các điểm ước lượng \hat{P} tương ứng với các tia chiếu từ điểm trong không gian đến camera tại vị trí thực. Tiện lợi của hàm tang là đơn điệu trong $\frac{1}{4}$ đường tròn, góc lệch được xem xét trong khoảng $[0, \pi/2]$. Ưu điểm của quy hoạch nón bậc hai (second order cone programming) trong lĩnh vực tối ưu hóa đa khung

nhìn [22] là có tính lồi để tìm điểm cực trị. Bài toán này được giải quyết bằng phương pháp tối ưu hóa tựa lồi (quasiconvex), sử dụng công cụ tối ưu của Matlab để giải.

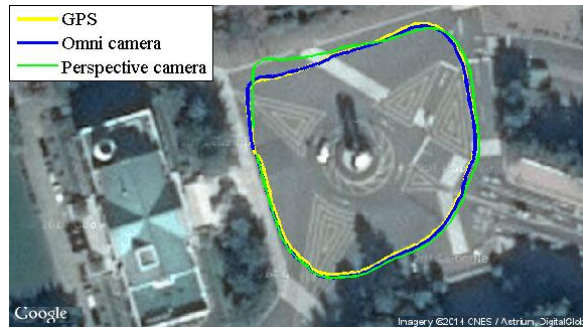
5. THỰC NGHIỆM

Quá trình thực nghiệm được thực hiện trên xe điện gắn các thiết bị bao gồm camera đa hướng, camera truyền thống, máy thu tín hiệu GPS và thiết bị đo LRF, được minh họa như Hình 4. Dữ liệu thực nghiệm bao gồm tập các ảnh tuần tự, vị trí GPS, tín hiệu LRF được thu thập đồng thời với nhau trong quá trình xe chuyển động. Hệ thống camera đa hướng bao gồm camera truyền thống gắn với gương hyperboloid. Độ phân giải của ảnh là 960×1280 pixels, điểm cơ sở (tâm) của ảnh đa hướng là (460,646), đường kính ngoài là 475 pixels, đường kính trong là 150 pixels. Thuật toán SIFT [20] được dùng để trích rút điểm đặc trưng và matching. Thiết bị SICK LMS-291 hoạt động với các thông số thiết lập gồm góc quét 180° , độ phân giải là 0.5 độ, phạm vi đo tối đa là 80m. Trong nghiên cứu này, LRF chỉ dùng để ước lượng chuyển động tịnh tiến (không dùng để tính chuyển động quay).

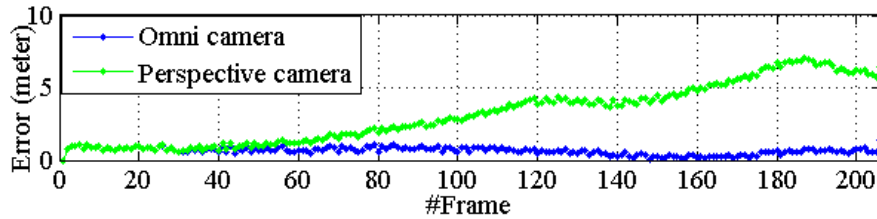


Hình 4. Các thiết bị dùng cho thí nghiệm.

Thí nghiệm thứ nhất, xe chuyển động trong địa hình có độ dốc nhỏ, độ dài lộ trình 209m, dữ liệu thu thập tại 206 vị trí trên lộ trình chuyển động của xe, tốc độ tối đa là 12km/h. Khoảng cách trung bình giữa các vị trí lấy dữ liệu khoảng 1m. Xuất phát tại tọa độ (35.543926, 129.25737). Vị trí xuất phát được sử dụng như là giá trị khởi tạo để tính toán quỹ đạo chuyển động. Hình 5 thể hiện quỹ đạo của xe ở góc nhìn top-view trên bản đồ vệ tinh của Google Maps. Trong thí nghiệm này, xe chuyển động trong môi trường không bị chướng ngại vật che khuất, nên tín hiệu GPS cho kết quả tương đối tốt, nó được dùng như là giá trị chuẩn để so sánh. Hình 6 thể hiện kết quả so sánh trên tiêu chí lỗi vị trí của xe trên toàn bộ quỹ đạo chuyển động. Kết quả cho thấy rằng, với camera truyền thống không cho phép tracking các đối tượng landmark tốt khi xe chuyển động lâu và có độ quay lớn. Ngược lại, với camera đa hướng nó có thể quan sát, tracking đối tượng trong tất cả các hướng (tracking các đối tượng trong khoảng chuyển động dài, độ quay lớn). Ưu điểm này được tận dụng để giúp kiểm tra chéo và hiệu chỉnh lại kết quả giúp giảm thiểu sai số ước lượng.



Hình 5. Quỹ đạo chuyển động của xe trong địa hình tương đối phẳng.

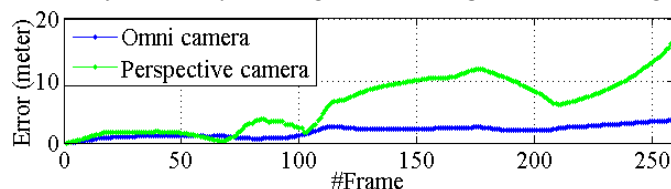


Hình 6. Lỗi vị trí xe khi ước lượng dùng camera đa hướng và camera truyền thống trong địa hình tương đối phẳng.

Thí nghiệm thứ hai, xe chuyển động trong địa hình có độ dốc lớn. Độ dốc tối đa là 30° , độ dài lộ trình 320m, với 259 key frames ảnh và laser. Vận tốc của xe thay đổi trong quá trình chuyển động. Khác với thí nghiệm trước, trong thí nghiệm này thiết bị IMU MTi-G-700 được dùng như là dữ liệu chuẩn để đối sánh, vì có nhà cao tầng và cây che khuất nên thiết bị GPS không cho kết quả tốt. Vị trí xuất phát tại (35.544445, 129.25623). Hình 7 thể hiện quỹ đạo chuyển động ước lượng trên bản đồ vệ tinh của Google Maps. Kết quả cho thấy rằng với các phương pháp kiểu VO luôn gặp vấn đề lỗi tích lũy. Định vị vị trí của thiết bị GPS không gặp phải vấn đề lỗi tích lũy, nhưng khi bị các vật che khuất, kết quả định vị cho sai số lớn. Hình 8 thể hiện kết quả so sánh về sai số vị trí của xe giữa các phương pháp dùng camera đa hướng và camera truyền thống. Sai số cực bộ lớn nhất của phương pháp đề xuất dùng camera đa hướng và camera truyền thống tương ứng là 4.15m và 16.7m. Cả hai thí nghiệm đều cho thấy rằng dùng các thiết bị này đều gặp phải lỗi tích lũy theo thời gian chuyển động. Vấn đề này luôn tồn tại khi hệ thống chỉ sử dụng các loại thiết bị như camera, LRF, IMU mà không sử dụng thiết bị định vị GPS.



Hình 7. Quỹ đạo chuyển động của xe trong địa hình đường dốc.



Hình 8. Lỗi vị trí của xe khi sử dụng camera đa hướng và camera truyền thống trong địa hình độ dốc.

6. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp ước lượng chuyển động của xe dựa vào kỹ thuật BA dùng camera đa hướng nhằm giảm thiểu lỗi trong chuyển động cục bộ. Ưu điểm của camera đa hướng là cho phép tracking rất tốt các keypoint trong khoảng chuyển động dài và độ quay lớn, điều này cho phép áp dụng các kỹ thuật tối ưu hóa cục bộ để giảm bớt, hiệu chỉnh sai số ước lượng. Thông thường các phương pháp xử lý kết quả tích lũy theo thời gian sẽ gặp vấn đề lỗi tích lũy. Để giảm thiểu lỗi này phương pháp tối ưu hóa cục bộ dựa trên cách tiếp cận BA sử dụng tiêu chuẩn cực tiểu hóa tổng góc lệch sai số giữa tia thu được từ quan sát tại các vị trí thực của camera và tia chiếu từ tập điểm keypoints ước lượng.

Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng kỹ thuật tối ưu hóa cục bộ dựa trên BA sử dụng camera đa hướng sẽ cho kết quả tốt hơn dùng camera truyền thống. Đây là nghiên cứu có ý nghĩa thiết thực, là cơ sở khoa học để ứng dụng trong tác vụ ước lượng chuyển động phục vụ cho việc phát triển các hệ thống robot/xe tự hành trong địa hình phức tạp ngoài trời.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Zhang, A. Geiger, and R. Urtasun, *Understanding High-Level Semantics by Modeling Traffic Patterns*, International Conference on Computer Vision (ICCV), 2013.
- [2] V. -D. Hoang, D. C. Hernández, M. -H. Le, and K. -H. Jo, *3D Motion Estimation Based on Pitch and Azimuth from Respective Camera and Laser Rangefinder Sensing*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, Japan, pp. 735-740, 2013.
- [3] A. C. Murillo, G. Singh, J. Kosecka, and J. J. Guerrero, *Localization in Urban Environments Using a Panoramic Gist Descriptor*, IEEE Transactions on Robotics, vol. 29, pp. 146-160, 2013.
- [4] M. -H. Le, V. -D. Hoang, A. Vavilin, and K. -H. Jo, *Vehicle Localization Using Omnidirectional Camera with GPS Supporting in Wide Urban Area*, Computer Vision - ACCV 2012 Workshops. vol. 7728, J. -I. Park and J. Kim, Eds. , ed: Springer Berlin Heidelberg, pp. 230-241, 2013.
- [5] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, *Visual odometry for ground vehicle applications*, Journal of Field Robotics, vol. 23, pp. 3-20, 2006.
- [6] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, and J. -M. Lavest, *Monocular Vision for Mobile Robot Localization and Autonomous Navigation*, International Journal of Computer Vision, vol. 74, pp. 237-260, 2007.
- [7] D. V. García, L. F. Rojo, A. G. Aparicio, L. P. Castelló, and O. R. García, *Visual Odometry through Appearance- and Feature-Based Method with Omnidirectional Images*, Journal of Robotics, vol. 2012 p. 13, 2012.

- [8] K. Konolige, M. Agrawal, and J. Solà, *Large-Scale Visual Odometry for Rough Terrain*, Robotics Research. vol. 66, M. Kaneko and Y. Nakamura, Eds. , ed, pp. 201-212, 2011.
- [9] I. Markovic, F. Chaumette, and I. Petrovic, *Moving object detection, tracking and following using an omnidirectional camera on a mobile robot*, Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on, pp. 5630-5635, 2014.
- [10] D. Scaramuzza, *Omnidirectional camera*, Computer Vision: A Reference Guide, pp. 552-560, 2014.
- [11] F. Labrosse, *The visual compass: Performance and limitations of an appearance-based method*, Journal of Field Robotics, vol. 23, pp. 913-941, 2006.
- [12] C. Mei and P. Rives, *Single View Point Omnidirectional Camera Calibration from Planar Grids*, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3945-3950, 2007.
- [13] V. -D. Hoang, D. Hernández, and K. -H. Jo, *Combining Edge and One-Point RANSAC Algorithm to Estimate Visual Odometry*, Intelligent Computing Theories. vol. 7995, D. -S. Huang, *et al.* , Eds. , ed, pp. 556-565, 2013.
- [14] S. Y. Chen, *Kalman Filter for Robot Vision: A Survey*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, pp. 4409-4420, 2012.
- [15] L. Wenling and J. Yingmin, *Location of Mobile Station With Maneuvers Using an IMM-Based Cubature Kalman Filter*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, pp. 4338-4348, 2012.
- [16] P. Pfaff, R. Triebel, C. Stachniss, P. Lamon, W. Burgard, and R. Siegwart, *Towards Mapping of Cities*, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) pp. 4807-4813, 2007.
- [17] J. -H. Choi, Y. -W. Park, J. -B. Song, and I. -S. Kweon, *Localization using GPS and vision aided INS with an image database and a network of a ground-based reference station in outdoor environments*, International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 9, pp. 716-725, 2011.
- [18] L. Wei, C. Cappelle, Y. Ruichek, and F. Zann, *GPS and Stereovision-Based Visual Odometry: Application to Urban Scene Mapping and Intelligent Vehicle Localization*, International Journal of Vehicular Technology vol. 2011, p. 17, 2011.
- [19] T. Suzuki, M. Kitamura, Y. Amano, and T. Hashizume, *6-DOF localization for a mobile robot using outdoor 3D voxel maps*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5737-5743, 2010.
- [20] D. Lowe, *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*, International Journal of Computer Vision, vol. 60, pp. 91-110, 2004.
- [21] R. Kawanishi, A. Yamashita, and T. Kaneko, *Estimation of camera motion with feature flow model for 3D environment modeling by using omni-directional camera*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3089-3094, 2009.
- [22] K. Qifa and T. Kanade, *Quasiconvex Optimization for Robust Geometric Reconstruction*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 29, pp. 1834-1847, 2007.