

# 放物運動拘束を利用した単眼視ビジュアルオドメトリに関する検討

## A Study on Monocular Visual Odometry using Parabolic Motion Constraints

○正 大津 恭平 (東大)      正 前田 孝雄 (名大)  
 正 大槻 真嗣 (ISAS/JAXA)    正 久保田 孝 (ISAS/JAXA)

Kyohei OTSU, The University of Tokyo, kyon@ac.jaxa.jp  
 Takao MAEDA, Nagoya University  
 Masatsugu OTSUKI, ISAS/JAXA  
 Takashi KUBOTA, ISAS/JAXA

This paper presents a novel method of monocular visual odometry for a hopping robot, or a hopper. Firstly, a monocular scheme of visual odometry is applied to estimate the relative poses between three frames up to a scale factor. The scale ambiguity is resolved with the parabolic motion constraints of hopping robots. The whole trajectory can be recovered by estimating motion parameters including the initial velocity and angle. The proposed method is validated with synthetic data, and proved that it can accurately estimate the hopping motion with the absolute scale using only a single monocular camera.

**Key Words:** Monocular Visual Odometry, Hopping Robot, Parabolic Motion Constraint, Scale Estimation

### 1 緒言

近年様々な惑星探査が行われる中で、さらなる科学的成果を求めてより困難な地形へのアクセスが要求されるようになってきた。とりわけ従来の車輪移動型ローバでは走破できない急勾配な崖や岩石などの障害物が多い地形に対して、跳躍移動の有効性が期待されている。跳躍移動は1) ロボット自身より大きい障害物を効率的に回避できる、2) 粘着力の小さい小重力天体においても移動可能であるといった特徴を持つ [1]。そのため、小惑星 [2]、彗星 [3]、衛星 [4]、火星 [5] などを対象に様々な跳躍移動型ロボット (Hopper) が提案されてきた。また跳躍機構は重力の比較的大きい地球においても有効で、既に実用化されているロボットは鉛直方向に 8m 程度の跳躍を実現している (図 1)[6]。

跳躍による移動は不確定な地面の状態に大きく依存するため、目的地へ正確に到達するためには跳躍軌道を外的に推定することが必要である。位置推定を行うためのセンサとしては、加速度計やジャイロなどの慣性センサ、触覚センサ、太陽センサ、カメラを合わせて用いることが一般的である [2, 7, 8, 9]。慣性センサベースの位置推定は文献 [7]

で議論されているようにドリフト誤差が不可避であることから、本論文においてはカメラを用いた位置推定手法に着目し検討を行う。

カメラを用いた相対位置推定手法はビジュアルオドメトリ (Visual Odometry: VO) と呼ばれ、地上および宇宙ロボットにおいて広く利用されてきた [10, 11]。VO には主に単眼視によるものとステレオ視によるものがあるが、Hopper に搭載されるカメラはその物理的制約から小型であり、十分な基線長 (カメラ間距離) が取れないためステレオ視は実現が難しい。そこで単眼視 VO を念頭に検討を行うが、単眼視においても次の課題が指摘されている。

- スケール不定性: 単眼視ではカメラ運動の並進成分のスケールを一意に定めることができない。
- 回転による視野変化: 跳躍中の連続的な回転運動により、視野が地面から外れ運動推定が断続的になる。

単眼視固有の問題であるスケール不定性は、既知の長さを利用することで解決することができる。例えば GPS/INS を用いて運動の大きさを測る手法 [12] や、ロボットの影等の既知長の物体を用いる手法 [2]、位置関係の分かる他のカメラを併用する手法 [9, 13] が知られている。一方で回転による視野変化は、運動中の姿勢制御 [6] や、モデルベースの補完手法 [8] により解決されてきた。しかし、これら従来の手法では単眼カメラに加えて別のセンサやアクチュエータを必要としたり、使用条件が限られているという問題があり、上記 2つの課題を解決するには不十分である。

そこで、本論文では Hopper の運動拘束を利用することで上記課題を同時に解決する手法を提案する。同様の運動拘束を用いる手法として車両の旋回運動を拘束として用いる手法 [14] が知られているが、Hopper の場合は図 1 のような放物運動を拘束として用いることで、軌道を絶対スケールで復元することができる。この拘束を用いれば 3 視点で同一地面を観測できれば必要な運動パラメータを復元でき



**Fig.1:** Jumping robot SandFlea hops onto the rooftop with a parabolic trajectory (Image by BostonDynamics)

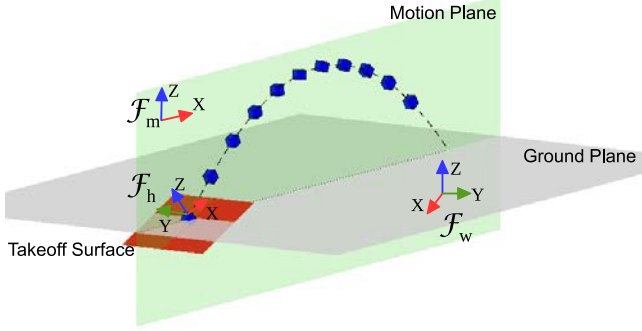


Fig.2: Coordinate systems for a hop motion

るため、回転による視野変化が起こる場合でも一部の画像から全軌跡の推定を行うことが可能である。提案手法は理想的な放物運動をする環境、すなわち空気抵抗による外乱がない小惑星や月といった天体において特に有効である。

## 2 放物運動モデル

跳躍により Hopper は空間を放物線軌道を描きながら移動する。本節では跳躍運動の数学モデルについて述べる。

### 2.1 表記

3次元座標系  $\mathcal{F}_a$  における任意のベクトルを上付添字を用い  ${}^a\mathbf{X} = [x, y, z]^T$  と表記する。座標系間の関係は回転行列と並進ベクトルで記述できるため、座標系  $\mathcal{F}_a$  と  $\mathcal{F}_b$  について次のように表すことができる。

$${}^a\mathbf{X} = R_{a,b} {}^b\mathbf{X} + {}^a\boldsymbol{\rho}_{a,b} \quad (1)$$

ただし  $R_{a,b} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は回転行列、 ${}^a\boldsymbol{\rho}_{a,b} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  は  $\mathcal{F}_a$  における  $a$  から  $b$  へのベクトルである。

### 2.2 座標系

本稿での座標系を図2のように定義する。世界座標系  $\mathcal{F}_w$  における  $X$ - $Y$  平面が局所水平面を形成しており、重力方向は  $-Z$  方向である。機体座標系  $\mathcal{F}_h$  は Hopper の重心を原点とし、指向型の跳躍機構により初期速度ベクトルが理想的には  $X$ - $Z$  平面上に存在するものとする。また、特に初期位置における機体座標系を  $\mathcal{F}_0$  とし、 $X$ - $Y$  平面を離陸平面と呼ぶ。カメラ座標系  $\mathcal{F}_c$  は機体座標系に対して固定であり、その関係を  $\{R_{h,c}, {}^h\boldsymbol{\rho}_{h,c}\}$  で表す。

運動平面は運動座標系  $\mathcal{F}_m$  の  $X$ - $Z$  平面と定義する。ただし、 $\mathcal{F}_m$  の  $X$  方向は Hopper の水平移動方向であり、 $Z$  方向は  $\mathcal{F}_w$  と同じで鉛直上向き方向とする。

### 2.3 放物運動

初速度  $v_0$ 、射出角度  $\theta_0$  の放物運動を考える。時刻  $t$  における機体座標系  $\mathcal{F}_h$  の位置は運動座標系  $\mathcal{F}_m$  において以下のように記述される。

$${}^m\boldsymbol{\rho}_{0,t} = \begin{bmatrix} v_{0x} \\ 0 \\ v_{0z} \end{bmatrix} t + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} t^2 \quad (2)$$

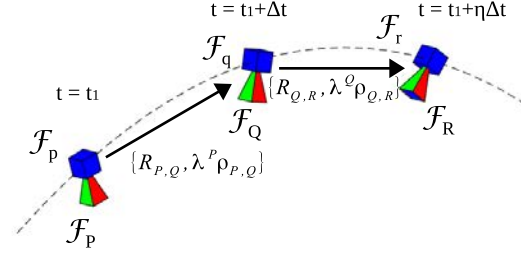


Fig.3: Camera frames

ただし、

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta_0 \quad (3)$$

$$v_{0z} = v_0 \sin \theta_0 \quad (4)$$

である。ここで重力場の方向と大きさが Hopper の移動中で一定であると仮定しているが、脱出速度より十分に小さい速度では移動量は小さく妥当であると考えられる。

一方で、跳躍時の地面との摩擦によって Hopper には回転運動が生じる。飛翔時の姿勢制御を行わない場合、Hopper は同じ軸周りに等角速度で回転し続ける。理想条件では回転軸は離陸平面の垂線と初期速度方向に垂直である [8]。それゆえ角速度を  $\omega_0$  とした場合、時刻  $t$  における回転行列は次のように表される。

$$R_{0,t} = \begin{bmatrix} \cos \omega_0 t & 0 & \sin \omega_0 t \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega_0 t & 0 & \cos \omega_0 t \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 3 運動拘束を用いた相対位置推定法

単眼視 VO と放物運動拘束を利用した運動推定手法について述べる。まず3視点から同じ地面を観測し、特徴点の追跡から視点間の相対姿勢を推定する。ここで求めた相対姿勢は絶対スケール  $\lambda$  に関する不定性がある。スケールの不定性は既知の重力加速度を用い、運動拘束から解決する。

### 3.1 単眼視 VO による運動推定

カメラが図3のように運動している場合を考える。 $\mathcal{F}_P, \mathcal{F}_Q, \mathcal{F}_R$  はそれぞれ時刻  $t_1, t_1 + \Delta t, t_1 + \eta \Delta t$  (ただし  $\Delta t > 0, \eta > 1$ ) のカメラ座標系であり、 $\mathcal{F}_p, \mathcal{F}_q, \mathcal{F}_r$  はそれに対応する機体座標系である。

カメラ座標間の相対姿勢は既存の単眼視 VO アルゴリズム (e.g., [10]) を用いて  $\{R_{P,Q}, \lambda^P \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q}\}, \{R_{P,R}, \lambda^P \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R}\}$  のように算出することができる。単眼視による推定のため並進成分  $\tilde{\boldsymbol{\rho}}$  はスケール不定である。3つの座標系間で共通の特徴点が追跡されていれば姿勢間の相対スケールを推定できるため、スケールファクタ  $\lambda$  は全体で共通である。

機体座標系とカメラ座標系の関係は既知としているため、各時刻における機体座標系の関係は次のように求められる。

$$R_{p,q} = R_{h,c} R_{P,Q} R_{h,c}^T \quad (6)$$

$$R_{p,r} = R_{h,c} R_{P,R} R_{h,c}^T \quad (7)$$

$${}^p\boldsymbol{\rho}_{p,q} = \lambda R_{h,c} {}^P\tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} + (I - R_{h,c} R_{P,Q} R_{h,c}^T) {}^h\boldsymbol{\rho}_{h,c} \quad (8)$$

$${}^p\boldsymbol{\rho}_{p,r} = \lambda R_{h,c} {}^P\tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R} + (I - R_{h,c} R_{P,R} R_{h,c}^T) {}^h\boldsymbol{\rho}_{h,c} \quad (9)$$

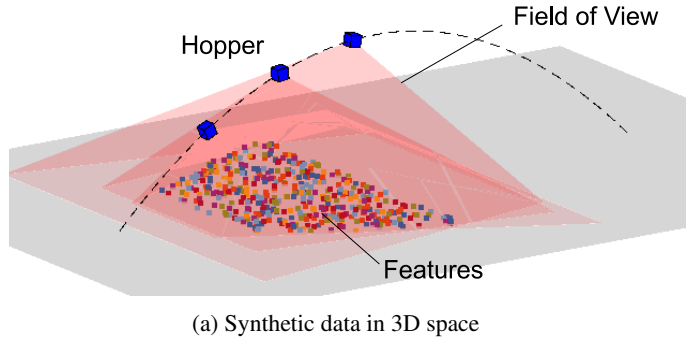


Fig.4: Synthetic data

また、式 (8, 9) において機体の運動が十分に大きいと仮定すると 2 項目は無視できるため、次の近似が得られる。

$${}^p \boldsymbol{\rho}_{p,q} \simeq \lambda R_{h,c} {}^P \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} = \lambda^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} \quad (10)$$

$${}^p \boldsymbol{\rho}_{p,r} \simeq \lambda R_{h,c} {}^P \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R} = \lambda^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R} \quad (11)$$

### 3.2 運動平面への変換

VO により求めた軌跡を運動平面上に対応させるため、 $\mathcal{F}_m$  と  $\mathcal{F}_p$  の関係を求める。その際、並進成分は無視し、

$${}^m \boldsymbol{\rho}_{p,q} = R_{m,p} {}^p \boldsymbol{\rho}_{p,q} \quad (12)$$

を満たす回転行列  $R_{m,p}$  を求めればよい。式 (2) より次の式を導くことができる。

$${}^m \boldsymbol{\rho}_{p,q} = \begin{bmatrix} v_{0x} \Delta t \\ 0 \\ v_{0z} \Delta t - g \Delta t (t_1 + \frac{1}{2} \Delta t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^m \boldsymbol{\rho}_{p,r} = \begin{bmatrix} v_{0x} \eta \Delta t \\ 0 \\ v_{0z} \eta \Delta t - g \eta \Delta t (t_1 + \frac{1}{2} \eta \Delta t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$R_{m,p}$  の  $n$  番目の行ベクトルを  $\mathbf{r}_n$  と表すことにすると、次の関係が成立する。

$$\mathbf{r}_1 \perp \eta^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} - {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R} \quad (15)$$

$$\mathbf{r}_2 \perp {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} \quad (16)$$

$$\mathbf{r}_2 \perp {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R} \quad (17)$$

$$\mathbf{r}_1 \perp \mathbf{r}_2 \perp \mathbf{r}_3 \quad (18)$$

よって、

$$\mathbf{r}_2 = \frac{{}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} \times {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R}}{\|{}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} \times {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R}\|} \quad (19)$$

$$\mathbf{r}_3 = \frac{\eta^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} - {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R}}{\|\eta^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} - {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R}\|} \quad (20)$$

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2 \times \mathbf{r}_3 \quad (21)$$

とすることで  $R_{m,p}$  を求めることができる。

### 3.3 運動拘束による放物運動およびスケール推定

放物運動を支配するパラメータ  $v_{0x}$  と  $v_{0z}$  およびスケールファクタ  $\lambda$  を求める。式 (8-14) から 3 変数に関する 4 式の多項式システムが導くことができる。その最小二乗解を次のように求める。

$$\begin{bmatrix} v_{0x} \\ v_{0z} \\ \lambda \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{b} \quad (22)$$

ただし

$$A = \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & -\mathbf{r}_1^T {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} \\ \eta \Delta t & 0 & -\mathbf{r}_1^T {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R} \\ 0 & \Delta t & -\mathbf{r}_3^T {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,Q} \\ 0 & \eta \Delta t & -\mathbf{r}_3^T {}^p \tilde{\boldsymbol{\rho}}_{P,R} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \Delta t (t_1 + \frac{1}{2} \Delta t) \\ g \eta \Delta t (t_1 + \frac{1}{2} \eta \Delta t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

である。求めた初速度を式 (2) に代入することで、任意の時間の位置を求めることが可能である。

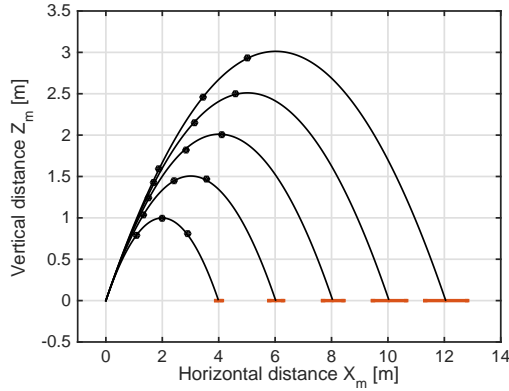
## 4 シミュレーション結果

人工的に生成したデータを用い、提案手法の定量的評価を行った。図 4 のように 3 視点から共通して観測可能な地表面に無作為に特徴点を配置し、固定時刻の画像平面への投影を行った。画像解像度は  $640 \times 480$  [pixel]、水平面角を  $100$  [deg] とした。投影した画像特徴点には、標準偏差  $s_p$  の正規分布に従うノイズを  $0 \sim 1$  [pixel] の範囲で付加し、位置の検出ずれを模擬した。放物運動のパラメータは、離陸面と着陸面の高度が等しいと仮定し、次式で設定した。

$$(v_0, \theta_0) = (\sqrt{dg}, \frac{\pi}{4}) \quad (25)$$

なお、水平移動距離は  $d \in \{4, 6, 8, 10, 12\}$  [m] とした。ここで、重力  $g$  によって射出速度  $v_0$  および跳躍時間は変化するが、軌跡は重力に依らず一定である。

図 5 に各距離あたり 100 回の試行の平均軌道を示す。撮像のタイミングは時間固定であり、軌道上に黒点で示す。



**Fig.5:** Nominal hopping trajectory with landing uncertainty ( $\pm 2\sigma_d$ ) for pixel noise  $s_p = 0.2$  [pixel]

推定結果では単眼カメラのみを用いたにも関わらずスケールが一致しており、設定した水平移動距離  $d$  に対し着地点を正確に推定することができた。また、ピクセル誤差  $s_p = 0.2$  [pixel] に対応する着陸地点のばらつきを  $\pm 2\sigma_d$  の範囲で図中に記す。距離に応じて誤差のばらつきは大きくなるものの、10 [m] の移動においてばらつきは  $\pm 0.59$  [m] (5.9%) 程度であり、特徴点の位置ずれに対しても頑強な推定が行うことができている。

さらに、ピクセル誤差を変化させて水平移動距離の平均誤差と標準偏差を求めた (図 6)。平均誤差の  $d = 8$  [m] において外れ値が見られるが、傾向としては平均誤差、標準偏差ともに距離の 1.75 乗に比例するという結果が解析的に求められた。これにより特徴点の位置ずれを事前計測することで、誤差範囲を見積もることができると考えられる。

## 5 結言

本稿では画像を用いた Hopper の位置推定の検討を行った。単眼カメラによる VO を用いてスケール不定の運動を求め、のちに放物線軌道を拘束として用いることで絶対スケールおよび放物運動パラメータを推定した。これにより放物運動中の任意の 3 視点から同じ地面を観測できる限り、跳躍の全軌跡を絶対スケールで推定できることを示した。構築した手法はシミュレーションによって正当性を示した。また、ピクセル誤差に対する感度解析を行い、水平移動距離に関する誤差傾向を解析的に明らかにした。

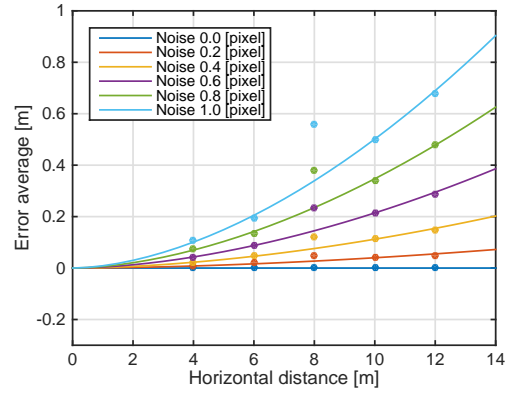
## 参考文献

[1] D. Mège, J. Gurgurewicz, J. Grygorczuk, c. Wiśniewski, and G. Thornell, "The Highland Terrain Hopper (HOPTER): concept and use cases of a new locomotion system for the exploration of low gravity Solar System bodies," *Acta Astronautica*, vol. 121, pp. 200–220, 2016.

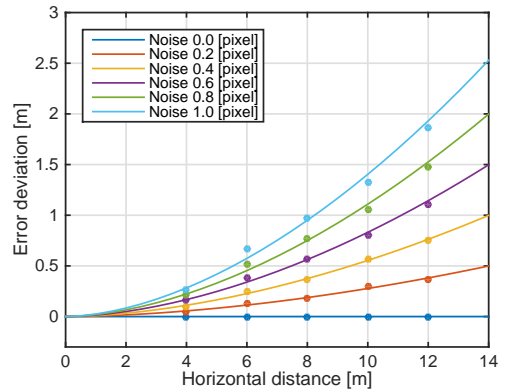
[2] T. Yoshimitsu, T. Kubota, S. Akabane, I. Nakatani, T. Adachi, H. Saito, and Y. Kunii, "Autonomous navigation and observation on asteroid surface," *International Symposium on artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space*, pp. 1–7, 2001.

[3] B. Clark and J. Sunshine, "Comet Hopper: A mission concept for exploring the heterogeneity of comets," in *Asteroids, Comets, Meteors*, p. 8131, 2008.

[4] R. Sagdeev and A. Zakharov, "Brief history of the Phobos mission," *Nature*, vol. 341, no. 6243, pp. 581–585, 1989.



(a) Mean error



(b) Standard deviation

**Fig.6:** Error statistics in horizontal distance estimation

[5] S. Montminy, E. Dupuis, and H. Champlaud, "Mechanical design of a hopper robot for planetary exploration using SMA as a unique source of power," *Acta Astronautica*, vol. 62, no. 6-7, pp. 438–452, 2008.

[6] BostonDynamics, "SandFlea jumping robot datasheet," [http://www.bostondynamics.com/robot\\_sandflea.html](http://www.bostondynamics.com/robot_sandflea.html).

[7] P. Fiorini, C. Cosma, and M. Confente, "Localization and sensing for hopping robots," *Autonomous Robots*, vol. 18, no. 2, pp. 185–200, 2005.

[8] E. So, T. Yoshimitsu, and T. Kubota, "Hopping odometry: motion estimation with selective vision," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3808–3813, 2009.

[9] E. So, T. Yoshimitsu, and T. Kubota, "Divergent stereo visual odometry for a hopping rover on an asteroid surface," in *International Symposium on Artificial Intelligence for Robotics and Automation in Space*, 2010.

[10] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, "Visual odometry for ground vehicle applications," *Journal of Field Robotics*, vol. 23, no. 1, pp. 3–20, 2006.

[11] Y. Cheng, M. W. Maimone, and L. H. Matthies, "Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 54–62, 2006.

[12] M. Pollefeys, D. Nistér, J. Frahm, A. Akbarzadeh, P. Mordohai, B. Clipp, C. Engels, D. Gallup, S. Kim, P. Merrell, C. Salmi, S. Sinha, B. Talton, L. Wang, Q. Yang, H. Stewenius, R. Yang, G. Welch, and H. Towles, "Detailed real-time urban 3D reconstruction from video," *International Journal of Computer Vision*, vol. 78, no. 2-3, pp. 143–167, 2008.

[13] B. Clipp, J. H. Kim, J. M. Frahm, M. Pollefeys, and R. Hartley, "Robust 6DOF motion estimation for non-overlapping, multi-camera systems," in *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 2008.

[14] D. Scaramuzza, F. Fraundorfer, M. Pollefeys, and R. Siegwart, "Absolute scale in structure from motion from a single vehicle mounted camera by exploiting nonholonomic constraints," *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1413–1419, 2009.