

Gezinge ve Konum Kestirim Yöntemlerinde Mesafe ve Atalet Duyargalarının Kullanımı

Using Range and Inertia Sensors for Trajectory and Pose Estimation

Furkan Çakmak, Erkan Uslu, Sırma Yavuz, M. Fatih Amasyalı, Muhammet Balcılar, Nihal Altuntaş
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
{furkan, erkan, sirma, mfatih, muhammet}@ce.yildiz.edu.tr, nihaltuntas@gmail.com

Mobil robotlarda gezinge çıkarımı, robotun harita üzerinde izlediği yolun belirlenmesi ve bu yol üzerinden robotun hedefine olan mesafesinin tespiti, robotun engellere takılmadan güvenli bir şekilde yoluna devam edebilmesi ve robotun eğitilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, belirlenen bir alan içerisinde mobil bir robot ile tekerlek odometrisi kullanılmadan gezinge çıkarımı amaçlanmıştır. Bunun için temel olarak 2 farklı yöntem kullanılmıştır. İlki, en çok kullanılan eş zamanlı konum belirleme ve haritalama (SLAM) algoritmalarından olan sadece lazer mesafe duyargası bilgisini kullanan gMapping ile gezinge çıkarımı, ikincisi ise lazer mesafe duyargası tabanlı laser_scan_matcher (LSM) ile gezinge çıkarımıdır. LSM ile gezinge çıkarımında hız bilgisi ve atalet duyargası da kullanılmıştır. Tüm yöntemler, alt başlıklar halinde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler — gezinge çıkarımı, LSM, gMapping.

Trajectory estimation is important for mobile robots as it can be used in path extraction, distance to target estimation, obstacle avoidance and autonomous control. This work mainly focuses on trajectory and pose estimation based on range and inertia sensors without the need of wheel odometry. Mainly two different approaches are implemented for trajectory and pose estimation namely simultaneous localization and mapping (SLAM) based gMapping and iterative closest point based laser_scan_matcher (LSM) implementation is improved with the use of inertia sensor and kinematic velocity information. These methods are explained in subsections.

Keywords — trajectory estimation, LSM, gMapping.

I. GİRİŞ

Mobil robotlarda gezinge çıkarımında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan en temeli tekerlek odometrisi

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK (EEEAG- 113E212) ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce (2013-04-01-KAP02) desteklenmiştir.

kullanılarak üretilmiş çözümlerdir [1]. Bu çözümde, mobil robot üzerinde bulunan tekerleklerin dönme miktarına bakılarak kinematik denklemler aracılığıyla gezinge çıkarılmaktadır. Burada tekerleğin döndüğü kadar robotun gittiği varsayılmaktadır. Oysaki yer çekiminden veya yerin sürtünme kuvveti gibi sebeplerden kaynaklanan ötelenmeler ve yerinde saymalar robotun tekerleklerinin döndüğünden farklı miktarda hareket etmesine sebep olacaktır. İşlem karmaşıklığı az olmasına rağmen ortam bağımlı ve düşük performanslı bir yöntemdir.

Bir diğer yöntem, lazer mesafe duyargası kullanılarak yapılan, tarama işlemeye dayalı LSM [2, 3] yöntemidir. Bu yöntemde, bir lazer mesafe duyargası ile ardışık zamanlarda alınan ortama ait ölçüm bilgileri kıyaslanarak robotun hareketin (translation) ve dönmesinin (rotation) ne kadar olduğu hesaplanmaktadır. Sadece son iki ölçümün değerlendirilmesi ve lazer mesafe duyargasının ölçüm mesafesinin uzunluğu, özellikle birbirine çok benzeyen ortamlarda (düz bir koridor vb.) alınan taramaların birbirine benzemesi sebebiyle gezinge çıkarımı yapılamamaktadır. Ancak LSM ile birlikte robotun hız bilgisi ve/veya atalet duyargasından alınan bilgi gibi çeşitli ek bilgiler kullanılarak bu sorun en aza indirilebilmektedir.

Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bir diğeri de SLAM algoritmaları ile gezinge çıkarımıdır [4-7]. Bu yöntemlerde LSM'de olduğu gibi tarama eşleme ile konum belirleme yapılmaktadır. Önemli noktalardan birisi konum belirlemenin sadece ardışık zamanlarda alınan tarama verileriyle olmaması aynı zamanda önceden alınan verilere göre hesaplanan konumların bilgisinin gezinge çıkarımında kullanılmasıdır.

Özellikle son araştırmalarda görsel odometrinin gezinge çıkarımında kullanıldığı görülmektedir [8, 9]. Bu çalışmalarda bir kamera yardımı ile farklı zaman aralıklarında ortamın görüntüsü alınmakta ve bu görüntüler birbirleri ile eşlenmeye çalışılarak robotun hareket ve dönme miktarı hesaplanabilmektedir. Derinlik bilgisi okuyabilen kameralar (Kinect vb.) ile lazer mesafe

duyargasının işlevine ek olarak görüntü bilgisi de kullanıldığı için daha doğru sonuçlar üretilmektedir.

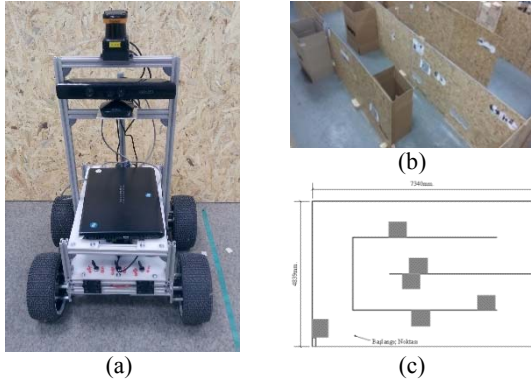
Bu çalışma kapsamında LSM ve SLAM tabanlı gezeğin çıkarım yöntemleri üzerinde durulmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan robot platformunun ve çalışma alanının özellikleri verilmiş, üçüncü bölümünde gezeğin çıkarım yöntemleri üzerinde durulmuş, dördüncü bölümde karşılaştırmalı olarak deneysel sonuçlara, sonuç bölümünde ise genel çıkarımlara ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.

II. SİSTEM TANITIMI

Yapılan çalışmada, Robot Operating System (ROS) uyumlu olarak geliştirilen tekerlekli bir robot platformu kullanılmıştır. Deneyler için 734×484 cm boyutlarında bir alan oluşturulmuştur. Alt bölümlerde robot platformuna ve çalışma alanına ilişkin detaylı bilgi verilmiştir.

A. Robot Platformu

Deney kapsamında, 4 tekerlek çekişli, diferansiyel sürüşlü, üzerinde bir adet 3000 cm'ye kadar 270 derecelik ölçüm yapabilen Hokuyo UTM-30LX lazer mesafe ölçüm duyargası ve bir adet Microstrain 3DM-GX3-25 atalet duyargası bulunan, yönetme kolu ile kumanda edilen, 52×47×85 cm boyutlarında bir mobil robot kullanılmıştır. Robotun görünümü Şekil 1-a'da verilmiştir. Robot, ROS Hydro sürümü ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 1. (a) Robot platforma ait görsel, (b) çalışma alanına ilişkin görsel, (c) çalışma alanına ilişkin plan.

B. Çalışma Alanı

Çalışma ortamı 734×484×120 cm boyutlarında suntuadan yapılmış labirent şeklinde bir alandır. Şekil 1-b'de çalışma alanı görseline, Şekil 1-c'de ise çalışma alanına ait plana yer verilmiştir. Labirentin koridorlarının x ekseninde uzunlukları 600 cm'dir.

III. GEZİNGE ÇIKARIM YÖNTEMLERİ

Robotun gezinmesi esnasında 7 farklı gezeğin çıkartılmaktadır. İlki yer gerçeği gezinmesidir. Bu gezeğin, robota yerleştirilen bir işaretleyici yardımı ile çalışma alanı içerisinde robotun gezdiği gerçek konumun yere

çizilmesi, ardından diğer gezinmelerle kıyaslayabilmek için çizimin sayısallaştırılmasından oluşmaktadır. Bunun dışında 6 farklı gezeğin çıkarım yöntemi daha uygulanmıştır. Bunlara ait yapılandırmalar ve gezeğin yöntemlerini temsil eden renkler Tablo-1'de verilmiştir.

A. Kinematik Tabanlı Gezeğin Çıkarımı

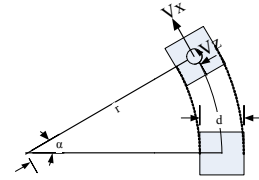
Kinematik tabanlı gezeğin çıkarımında robotun hız bilgisinden yararlanılmıştır. Açık çevrim kontrollü olarak anlık hız bilgisinin zamanla çarpımından gidilen yol bilgisi elde edilmektedir. Şekil 2'de robotun hareketine ait kinematik model resmedilmiştir.

Gezeğin Çıkarım Yöntemi	Kullanılan Duyargalar veya Bilgiler	Gezeğin Rengi
Kinematik	Hız	Red
gMapping	Lazer	Blue
LSM	Lazer	Green
LSM-K	Lazer + Hız	Yellow
LSM-A	Lazer + Atalet	Orange
LSM-AK	Lazer + Hız + Atalet	Cyan
Yer Gerçeği	-	Magenta

Tablo 1. Konfigürasyon tablosu

Robota ilişkin ilk poz durumundan (x_0, y_0, θ_0) Δt süre sonraki oluşacak poz durumuna (x_1, y_1, θ_1) geçiş (1) ile verilen şekilde hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + V_x \cos(\theta_0) \Delta t \\ y_1 &= y_0 + V_x \sin(\theta_0) \Delta t \\ \theta_1 &= \theta_0 + V_z \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$



Şekil 1. Kinematik model.

B. Laser_scan_matcher (LSM) Tabanlı Gezeğin Çıkarımı

Lazer mesafe duyargası temelli gezeğin tespiti algoritması olan LSM [2], iteratif en yakın nokta (ICP) temelli nokta-doğru ölçüt iteratif en yakın nokta (PLICP) algoritmasıdır. ICP algoritması, verilen $\{p_i\}$ noktalar kümesinden S^{ref} yüzeyine hangi $q = (t, \theta)$ roto-translation (dönüş $(R(\theta))$ ve öteleme (t)) ile ulaşacağını yinelemeli olarak hesaplayan bir yöntemdir. $\{p_i\}$ noktalar kümesi için q roto-translation tanımı (2) ile verilebilir.

$$p \oplus q = p \oplus (t, \theta) \triangleq R(\theta)p + t \quad (2)$$

ICP algoritması q ile dönüştürülmüş p_i noktalar kümesinin S^{ref} 'te Öklid karşılıkları olan noktalar ile uzaklıklarını q üzerinden en küçüklemeye çalışmaktadır. ICP için (3)'de verilen kısıt denkleminde, $\Pi\{S^{ref}, p\}$ ile S^{ref} üzerine Öklid izdüşümü ifade edilmektedir.

$$\min_q \sum_i \|p_i \oplus q - \Pi\{S^{ref}, p_i \oplus q\}\|^2 \quad (3)$$

(3) ile verilen denklem için kapalı formda bir çözüm olmadığından bir q_0 ilk dönüşüm durumundan hareketle ICP için yinelemeli kısıt denklemi (4) ile verilebilir.

$$\min_{q_{k+1}} \sum_i \|p_i \oplus q_{k+1} - \Pi\{S^{ref}, p_i \oplus q_k\}\|^2 \quad (4)$$

$\Pi\{S^{ref}, \cdot\}$ 'e ilişkin tanımlara göre farklı ICP yaklaşımları tanımlanmıştır. PLICP algoritması ise karşılaştırılacak noktanın referans yüzeyi üzerinde en yakın olduğu doğruya mesafesini kapalı formda bir çözüm ile kullanmaktadır. Bu sebeple, nokta-nokta eşleştirmeleri doğrusal yakınsarken, PLICP karesel olarak yakınsar. n_i^T , referans yüzeyde en yakın doğru normalinin transpozu olmak üzere, PLICP kısıt denklemi (5) ile verilmektedir.

$$\min_{q_{k+1}} \sum_i (n_i^T [p_i \oplus q_{k+1} - \Pi\{S^{ref}, p_i \oplus q_k\}])^2 \quad (5)$$

PLICP algoritması, y_{t-1} referans lazer taraması, y_t ikinci lazer taraması, q_0 dönüşüm değeri, i ikinci lazer ölçümü nokta indisleri, j referans lazer taraması nokta indisleri ve k yineleme adımı indisi olmak üzere;

Algoritma PLICP
Girdi: y_{t-1}, y_t, q_0
$S^{ref} \leftarrow y_{t-1}$ den oluşturulan parçalı doğru yüzeyi, $k \leftarrow 0$ repeat $p_i^w \leftarrow p_i \oplus q_k$ $j_1^i, j_2^i \leftarrow p_i^w$ 'ye en yakın iki nokta ($j_1^i, j_2^i \in y_{t-1}$) $C_k \leftarrow$ tüm $\langle i, j_1^i, j_2^i \rangle$ üçlülere C_k 'dan aykırı değerleri temizle $J(q_{k+1}, C_k) \leftarrow \sum_i (n_i^T [R(\theta_{k+1})p_i + t_{k+1} - p_{j_1^i}])^2$ J 'yi en küçükleyen q_{k+1} değerini bul $k \leftarrow k+1$ until (max iterasyon sayısı) or (yakınsama) Çıktı: q

LSM yönteminde kinematik bilgisinin dahil edilmesinde (LSM-K), ilk dönüşüm tahmini olan q_0 için öteleme parametresi (t) ilk durumun kinematik model ile belirlenmesi yaklaşımı kullanılır. Atalet duyargası bilgisinin dahil edilmesinde (LSM-A), ilk dönüşüm tahmini olan q_0 için rotasyon parametresi ($R(\theta)$) ilk durumunun atalet duyargası ile belirlenmesi yaklaşımı kullanılır. Atalet duyargası ve kinematik bilgisinin birlikte dahil edilmesinde (LSM-AK), ilk dönüşüm tahmini olan q_0 için öteleme parametresi (t) ve rotasyon tahmini ($R(\theta)$) ilk durumun kinematik model ve atalet duyargası ile birlikte belirlenmesi yaklaşımı kullanılır.

C. gMapping Tabanlı Gezinge Çıkarımı

Eş zamanlı konum belirleme ve haritalama (SLAM) algoritmalarından gMapping [4] ile lazer mesafe duyargası kullanılarak gezinge çıkarılması amaçlanmıştır. gMapping'in LSM tabanlı gezinge çıkarım yöntemleri ile karşılaştırılmasındaki temel amaç, gezinge hatasının artımsal olmaması, global olarak giderilebilmesidir.

gMapping, Rao-Blackwellized Particle Filters (RBPF) kullanan hücre tabanlı harita çıkarım yöntemlerindendir. Her parçacık, robotun geçmiş pozların ve harita bilgisini tutmaktadır. Yeni lazer ölçümleri ile her parçacığın inancı yenilenmektedir. Parçacıkların inancı haritanın şeklini ve o an o harita üzerinde nerede olduğunu ihtiva etmektedir. Mesafe ölçümleri, tarama eşleştirme yönteminde kullanılmaktadır. Ardışık alınan iki taramanın birbirleri ile eşleştirilmeye çalışılması ile robotun yeni pozu hesaplanmaktadır. gMapping algoritmasının adımları;

1) Ölçüm: Yeni lazer ölçümü alınır.

2) Tarama Eşleme: Ardışık iki tarama eşleştirilir.

3) Örnekleme: Önerilen dağılımı $\pi(x_t | z_{1:t}, u_{0:t})$ örnekleyerek yeni nesil parçacıklar $\{x_t^{(i)}\}$, şimdiki parçacıklar $\{x_{t-1}^{(i)}\}$ üzerinden üretilirler.

4) Ağırlıklandırma: Her bir parçacık için (6) numaralı denklemde verildiği şekliyle parçacıkların bireysel ağırlıkları $w^{(i)}$ hesaplanır.

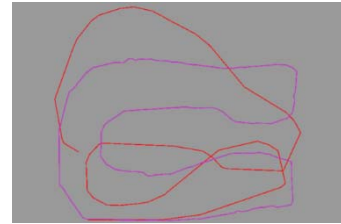
$$w^{(i)} = \frac{p(x_t^{(i)} | z_{1:t}, u_{0:t})}{\pi(x_t^{(i)} | z_{1:t}, u_{0:t})} \quad (6)$$

5) Yeniden Örnekleme: Bu aşamada düşük ağırlıklı parçacıklar yüksek ağırlıklı parçacıklarla yer değiştirirler.

6) Harita Kestirimi: Her bir poz için $x_t^{(i)}$, karşılık gelen harita tahmini $m_t^{(i)}$ gezingeye ve gözlem geçmişine $p(m_t^{(i)} | x_{1:t}^{(i)}, z_{1:t})$ dayanarak yeniden hesaplanır.

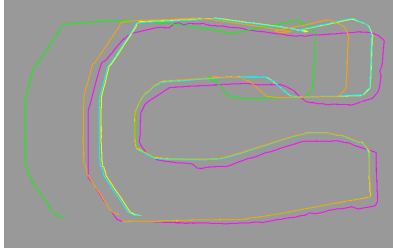
IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Deney sonuçları, robotun alanda bir tur gezdiği durum için elde edilmiştir. Tüm yöntemler için gezinimler eşzamanlı olarak hesaplanmıştır. Yer gerçeği gezinisi ise gezinim bittikten sonra sayısallaştırılmıştır. Geziniler hesaplanırken kullanılan bilgilerin çalışma frekansları aynıdır. Şekil 3'de yer gerçeğine karşılık, hız bilgisinin kullanıldığı durumda elde edilen kinematik gezinge verilmiştir. Sadece hız bilgisinin kullanıldığı durumda yerinde saymalar ve takılmalardan dolayı bulunan gezininin yer gerçeğinden oldukça saptığı görülmektedir.



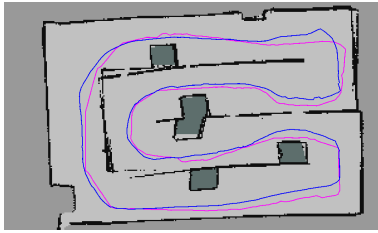
Şekil 2. Kinematik tabanlı gezinge ve yer gerçeği.

Şekil 4 ile LSM tabanlı gezege çıkarımları verilmektedir. LSM tabanlı gezege çıkarımı yöntemlerinin, artımlı ve yerel tahminler yaptıkları için, çevrimi tamamlamamadıkları gözlenmektedir. LSM tabanlı yöntemlerin dönüşlerde ve lazer ölçümünün değişmediği düz koridorlarda dahi birbirlerinden farklılaştıkları gözlenmektedir.



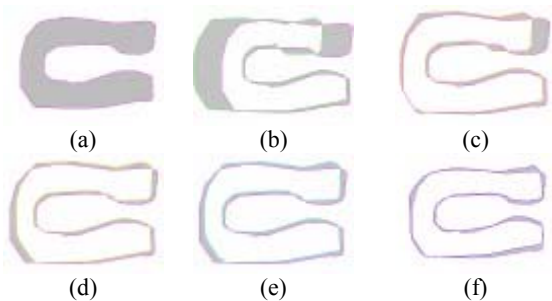
Şekil 3. LSM tabanlı gezinmeler ve yer gerçeği.

Şekil 5'te gMapping tabanlı gezege çıkarımı yer gerçeği ile birlikte verilmektedir. gMapping uygulamasında parçacık sayısı 10 olarak kullanılmıştır. gMapping ile oluşturulan gezege, harita bağımlı olarak elde edilmekle birlikte, çevrimin başarılı bir şekilde tamamlanabildiği görülmektedir.



Şekil 4. gMapping ve yer gerçeği gezinmeleri.

Görsel değerlendirmeler yanında, elde edilen gezinmeler için, yer gerçeğine benzerlik ölçütü olarak kapsanan alan farkı oranı verilmiştir. Gezege kapalı alanlarının yer gerçeğinden farkının yer gerçeği alanına bölünmesi ile bu ölçüt hesaplanmıştır. İdeal bir durum için, gerçek eğri ile hesaplanan eğri birbirine yaklaştıkça, bu oranın sıfıra yaklaşması beklenmektedir. Şekil 6 ile söz konusu alan farkları görsel olarak verilmiştir.



Şekil 5. Alan farkları ölçüsü: (a) Yer Gerçeği, (b) LSM, (c) LSM-A, (d) LSM-K, (e) LSM-AK, (f) gMapping.

Tablo 2 ile fark olan alan ile yer gerçeği alan oranları verilmektedir. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde, en başarılı gezege çıkarımının %19,88 fark oranı ile gMapping yöntemi ile elde edildiği görülmektedir. LSM tabanlı gezege çıkarımlarında ise kullanılan bilgiler arttıkça daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Gezege Çıkarım Yöntemi	Fark Oranı (% olarak)
gMapping	19,88
LSM-AK	31,98
LSM-K	33,17
LSM-A	34,40
LSM	74,91

Tablo 2. Gezinteler için alan fark oranları.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tekerlek odometrisi kullanmadan, lazer mesafe ve atalet duyargaları kullanarak oluşturulan gezinmeler, SLAM tabanlı gMapping gezinmesi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Artımsal yerel uygulamalar olan LSM tabanlı gezinmelerde çevrimin tamamlanmadığı, buna rağmen gMapping yönteminin, ortam haritası ile gezege oluşturduğu için çevrimi kapatabildiği ve fark alan ölçüsü olarak en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Kullanılan yöntemlerin yanı sıra görsel odometri dahil edilerek duyarga birleştirme ile gezege tahmininin daha başarılı bir şekilde elde edilmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Ganganath, N.; Leung, H., "Mobile robot localization using odometry and kinect sensor," *Emerging Signal Processing Applications (ESPA), 2012 IEEE Int. Conf. on*, pp.91,94, 12-14 Jan. 2012.
- [2] Censi, Andrea, "An ICP variant using a point-to-line metric," *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE Int. Conf. on*, pp.19,25, 19-23 May 2008.
- [3] Shu, L.; Xu, H.; Huang, M., "High-speed and accurate laser scan matching using classified features," *Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2013 IEEE Int. Symp. on*, pp.61,66, 21-23 Oct. 2013.
- [4] Grisetti, G.; Stachniss, C.; Burgard, W., "Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters," *Robotics, IEEE Transactions on*, 23(1):34-46, 2007.
- [5] Grisetti, G.; Stachniss, C.; Burgard, W., "Improving Grid-based SLAM with Rao-Blackwellized Particle Filters by Adaptive Proposals and Selective Resampling," *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on*, pp.2432,2437, 18-22 April 2005.
- [6] Kohlbrecher, S.; Von Stryk, O.; Meyer, J.; Klingauf, U., "A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation," *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE Int. Symp. on*, pp.155,160, 2011.
- [7] Esenkanova, J.; İlhan, H. O.; Yavuz, S., "Pre-Mapping system with single laser sensor based on gmapping algorithm," *IJOEE: Int. Journal of Electrical Energy*, 1(2):97-101, 2013.
- [8] Dryanovski, I.; Valenti, R.G.; Jizhong Xiao, "Fast visual odometry and mapping from RGB-D data," *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE Int. Conf. on*, pp.2305, 2310, 6-10 May 2013.
- [9] Nowicki, M.; Skrzypezyski, P., "Combining photometric and depth data for lightweight and robust visual odometry," *Mobile Robots (ECMR), 2013 European Conf. on*, pp.125,130, 25-27 Sept. 2013.