

İç Ortamda Çalışacak Otonom Bir Temizlik Robotu Tasarımı ve Uygulaması

Design and Implementation of an Autonomous Cleaning Robot to Work Indoors

Efecan Becer
Makina Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, TÜRKİYE
becer17@itu.edu.tr

Kemal Turan
Makina Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, TÜRKİYE
turanke18@itu.edu.tr

Onur Ulusoy
Makina Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, TÜRKİYE
ulusoyo18@itu.edu.tr

Erdoğan Altuğ
Otonom Sistemler Araştırma Laboratuvarı, *Makina Fakültesi*
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, TÜRKİYE
altuger@itu.edu.tr

Özetçe—Bu çalışma alışveriş merkezi, hava alanı veya depolar gibi geniş kapalı alanlarda çalışacak otonom bir temizlik robotunun tasarımı ve üretilmesi üzerinedir. Robot tasarımına ek olarak, temizlik isterlerine uygun geliştirilen temizlik sistemi ve otonomluğun gereği olan robot kontrolü, engel belirlleme ve sakınma, haritalama ve rota planlama çalışmaları anlatılmıştır. Geliştirilen prototip başarı ile görevini engellerden sakınarak temizlik görevini yapmaktadır.

Anahtar Kelimeler—*otonom robot, temizlik sistemi tasarımı, haritalama, hareket planlama.*

Abstract— This study is on the design and production of an autonomous cleaning robot that will work in large indoor areas such as shopping malls, airports or warehouses. In addition to the robot design, the cleaning system developed in accordance with the cleaning requirements and the robot control, which is the requirement of autonomy, obstacle detection and avoidance, mapping and route planning studies are explained. The developed prototype successfully performs its task of cleaning by avoiding obstacles.

Keywords— *autonomous robot, cleaning system design, mapping, motion planning.*

I. GİRİŞ

Özellikle son 30 yılda şehirleşme ve insan yoğunluğunun artması kirlilik problemini beraberinde getirmiş ve otonom temizlik robotlarına olan talep artmıştır. Temizlik robotlarına yönelik birçok çalışma yapılmış ve bu alanda büyüyen bir sektör ortaya çıkmıştır.

Robotik temizlik robotlarına yönelik ilk fikirler bilim kurgu eserlerinde 1950’lerde ortaya çıksa da [1] elektronik ve kontrol alanındaki gelişmelerle birlikte ilk prototiplerin ortaya çıkması 1990’ları bulmuştur. Otonom temizlik robotları alanında ilk ticari ürün 1996 yılında Electrolux Trilobite [2] olmuş, daha sonra geliştirilen iRobot Roomba [3] çarpışma algılayıcıları, fırçalayarak temizleme, engelden sakınma gibi özellikleri ile çok büyük ilgi görmüştür. Bu alanda bir çok çalışma yapılmıştır [4,5]. Bu sistemler kirlilik ve tozdan büyük verim kaybına uğrayan güneş panelleri temizliğinde [6,7], bina dış yüzey temizliğinde [8], balık çiftliği ve havuz

temizliğinde [9,10], hava kanalı temizliği [11], hayvancılık alanında temizlik için insan gücünün azaltılması amacıyla [12,13] kullanılmıştır. Bu sistemler sahil temizliğinden [14], 3B yazıcıdan çıkan parçaların temizliğine kadar birçok uygulamada [15-22] kullanım bulmuşlardır.

Literatür özetinde değinildiği üzere otonom robotun temizlik fonksiyonu için çalışma ortamına göre şekillenen çeşitli konseptler bulunmaktadır. Bu projede tasarlanan robotun alışveriş merkezi, havaalanı ve depolar gibi ortamlarda çalışacağı düşünüldüğünde ağırlıklı olarak yapılması gereken zeminden toz, kir ve küçük parçacıklar toplamak olacaktır. Bu nedenle bir tutucu tasarımından ziyade tozları süpürerek sürüklenme, vakumlayarak bir haznede toplama üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmada analitik ve sanal ortamlarda mühendislik hesapları gerçekleştirilmiştir. Autodesk Fusion 360 programında tasarım ve statik analiz araçları ile Autodesk CFD programları kullanılarak vakum sistemli temizlik robotu geliştirilmiştir. Ayrıca 3 boyutlu yazıcı, vakum sistemi bileşenlerinin imalatı için kullanılmıştır. Robotik işletim sistemi olarak ROS (Robot Operating System) kullanılmakta olup bizler tarafından ortaya çıkarılan DustBusterAI 1.0 isimli yazılım üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Haritalandırma işlemleri için ROS2 Cartographer paketi, genetik algoritma ve adaptif Monte Carlo yöntemi kullanılmıştır [25-35]. Ayrıca ROS2 Nav2 Paketi ve AMC Entegrasyonu ile navigasyon ve yapay zeka çalışmaları yapılmıştır. LIDAR, enkoder ve IMU gibi algılayıcılar kullanılarak hassas veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

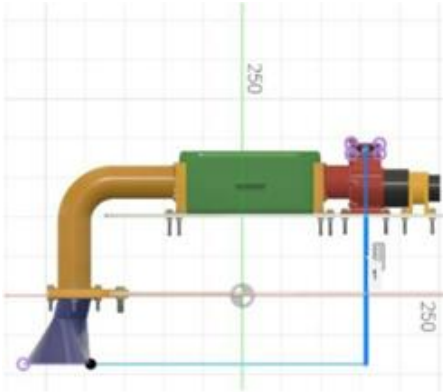
Birinci bölümde otonom temizlik robotlarından bahsedilmiştir. İkinci bölümde tasarım seçenekleri ve seçim kriterleri ele alınarak robot, temizlik sistemi tasarımı ve üretimi anlatılmıştır. Kontrol sistemi ve otonomlaştırma çalışmaları üçüncü bölümde sunulmuştur. Dördüncü bölümde geliştirilen prototiple yapılan çalışmalar ve beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Şekil 4. Fan gövdesi, kapağı, çarkı ve motor yatağının boyutlandırılması.



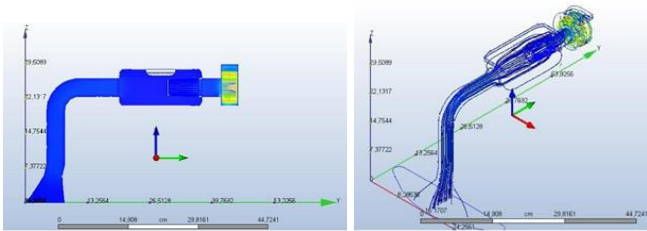
Şekil 5. Fan gövdesi, kapağı, çarkı ve motor yatağının tasarımı.

Piyasada bulunan temizlik robotlarının emiş gücü değerlerinin 1700 ile 2600 Pa. aralığında olduğu görülmektedir. Tasarladığımız vakum sistemi için şasenin büyüklüğü, piyasada bu büyüklükte bir temizlik robotu örneğinin olmaması ve 3D imalat sürecinden kaynaklanabilecek olası kayıplar gibi faktörleri dikkate alarak 3000 Pascal basınç farkı belirlenmiştir. Fan motorunun özellikleri dikkate alınarak akış detaylı olarak incelenmiştir. Olası kayıplar, boru çapı, boru kesiti ve uzunluğu, dirseklerdeki kayıplar göz önüne alınarak sistemdeki hacimsel debi ve çıkış noktasının yerden yüksekliği ve toplam basınç düşüşü hesaplanmıştır (Şekil 6). Önerilen iki alternatif sistemden biri seçildi ve vakum sistemi için hesaplanan toplam basınç düşüşü (ΔP) değeri oldukça küçük bir değer olan 0,2965 Pa olarak elde edilmiştir. Bu değer, sistemimizdeki kayıpların ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Analiz detayları [24]'de incelenebilir.

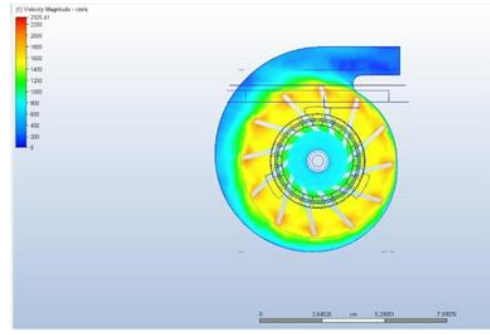


Şekil 6. Çıkış bölgesinin yerden yüksekliği.

Bir sonraki aşamada ilgili girdi bilgileri alınarak gerçek dünyadaki akışkan problemlerini sanal ortamda modelleme ve tasarımımızı bir simülasyon ortamında test etme amaçlarıyla Fusion 360 programı içindeki Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) aracı kullanılmıştır. Bu araç sayesinde, tasarımımızın akışkan davranışına nasıl tepki vereceği ve performansının nasıl etkileneceğini görmek için sanal deneyler yapılmıştır (Şekil 7 ve Şekil 8). HAD analizleri tasarımın uygun olduğuna işaret etmektedir.

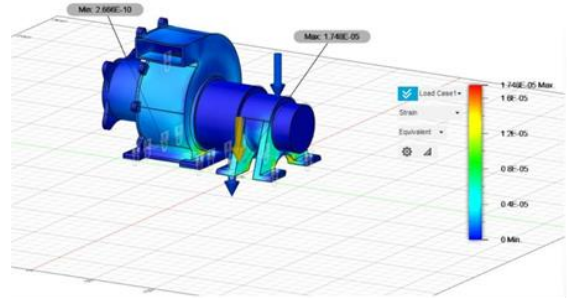


Şekil 7. Tasarımın HAD global görüntüsü ve akış çizgileri



Şekil 8. Tasarım fan görseli.

Ek olarak yapılan statik stres ve gerilme zorlanması analizleri (Şekil 9) ile tasarım analizleri tasarımın stres analizi açısından uygun ve güvenli olduğunu göstermektedir. Motor yatağı ve bağlantı elemanları, yeterli dayanıklılığa ve mukavemete sahip olduğu için tasarımın kullanım sırasında oluşabilecek streslere karşı dayanıklı olduğunu ve istenen performansı sağlaması beklenmektedir.



Şekil 9. Gerilme zorlanması analizi.

C. Eklemeli İmalat İle Üretim

Tasarlanan parçalar Fusion 360 programından “.stl” uzantısında alınarak Ultimaker Cura adlı eklemeli imalata hazırlığı sağlayan bir programda seçilen 3D yazıcı özellikleriyle ve yatak sıcaklığıyla katman kalınlığı gibi kullanıcıdan alınan parametrelerle “.gcode” uzantısında elde edilmektedir. Ayrıca üretilecek parçalarda gerekli yerlerde destek yapılarının yerleştirilmesi de sağlanmaktadır. Bu programın çıktısı 3D yazıcıya aktararak imalat yapılmaktadır (Şekil 10).

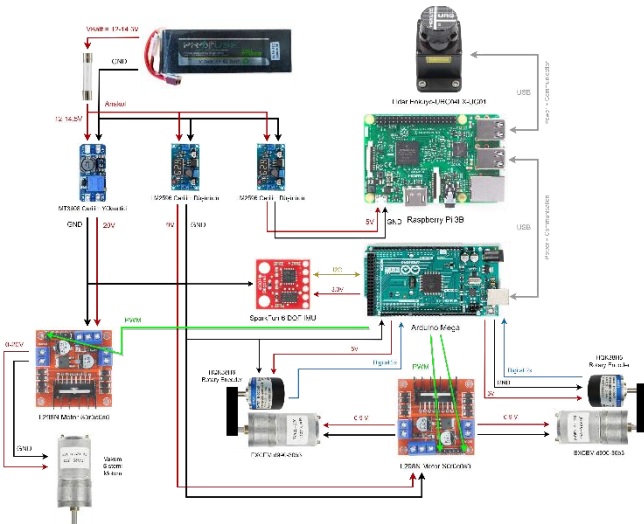


Şekil 10. Parçalar: a) başlık, b) destek, c) akış kanalı, d) destek, e) hazne, f) fan.

Kullanılan elektronik elemanlar Tablo-2’de listelenmiştir. Elektronik ve kontrol elemanları ve bağlantıları Şekil 11’deki grafikte gösterilmiştir.

Tablo-2: Kullanılan elektronik elemanlar

Raspberry Pi 3 Model B+	Lidar Lazer Taramalı Sensör Hokuyo URG-0 4LX-UG01
Arduino Mega 2560 R3	SPARKFUN 6 Serbestlik Dereceli IMU Digital Combo Board - ITG3200 / ADXL345
LM2596 Mini Ayarlanabilir Voltaj Regülatör Kartı 3A (4-35V ile 1.25-30V) (2 tane)	Raspberry Pi 4 Lisanslı Güç Adaptörü 5V 3A USB-C Beyaz
ProFuse 14.8V Lipo Batarya 5000mAh 45C	T Plug Dışı - Erkek Konnektör – Paralel Bağlantı (4 tane)
7 Segmentli Ayarlanabilir 3 A Voltaj Regülatör Kartı - LM2596-ADJ (2 tane)	USB Lojik Analizör - 24 MHz 8 Kanal
Raspberry Pi Micro USB Plug Erkek Konnektör 5.5/2.1 mm DC Dışı Barrel Dönüştürücü	L298N Voltaj Regülatörlü Çift Motor Sürücü Kartı(Kırmızı PCB)



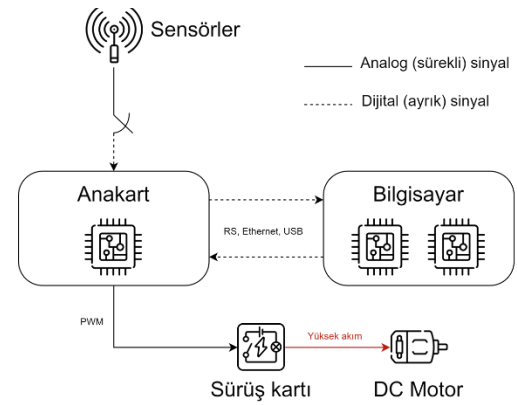
Şekil 11. Elektronik ve kontrol elemanları

3B yazıcı ile üretilen parçalar ve elektronik elemanlar ile birlikte robot hariç toplam maliyet 14.000TL olmuştur (Şekil 22).

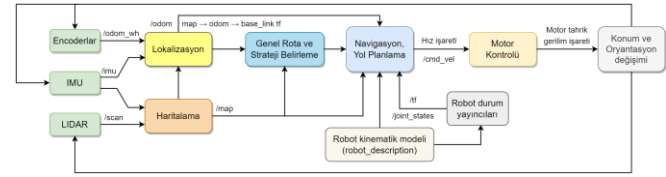
III. KONTROL SİSTEMİ VE OTONOMLAŞTIRMA

Havalimanları, depolar gibi geniş alanlarda verimli ve etkili temizlik çözümlerine olan ihtiyaca yanıt olarak geliştirilen DustBusterAI, yapay zekâ destekli robotik ve mekatronik teknolojilerin entegrasyonu ile yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. DustBusterAI yapay zekâ tabanlı temizlik çözüm algoritmalarını uygulamak için Robotik İşletim Sistemi 2 (ROS2) altyapısını kullanmaktadır. Geliştirme aşamasında Gazebo ve RViz simülasyon ve izleme platformlarından yararlanılır. Temel olarak Python ve C++ kullanılarak geliştirilen robotik algoritmaları, aracın gömülü bilgisayarında çalışır.

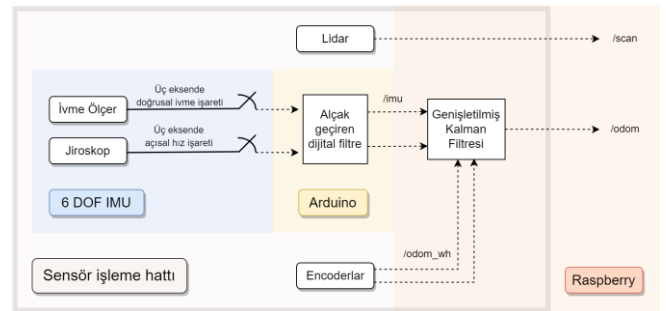
Sistem elektronik akış diyagramı Şekil 12’de otonom akış diyagramı Şekil 13’de gösterilmiştir. Algılayıcılardan (LIDAR, IMU ve enkoderler) alınan bilgiler filtrelenerek toplanmaktadır. Kalman filtresi ve ROS Cartographer SLAM ile farklı algılayıcılardan alınan bilgiler birleştirilerek çevre farkındalığı yaratılmaktadır (Şekil 14 ve 15). Geliştirilen planlama algoritmaları ile gidilmesi gereken noktalar



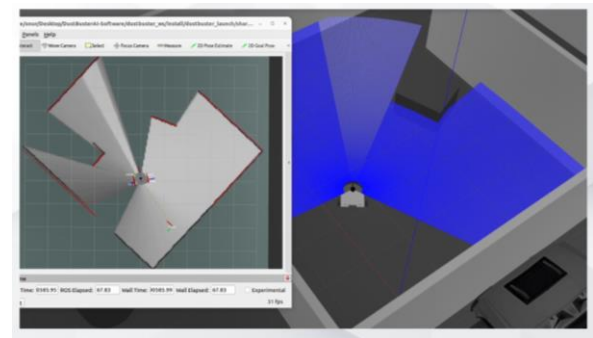
Şekil 12. Elektronik akış diyagramı.



Şekil 13. Otonom akış diyagramı.

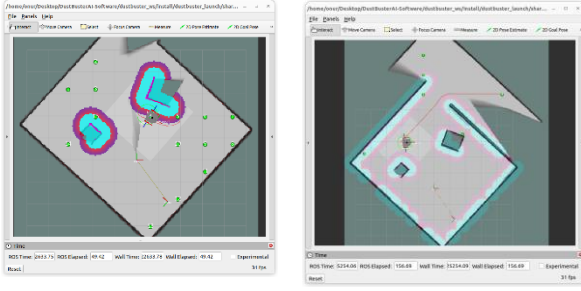


Şekil 14. Algılayıcı verilerinin yorumlanması.

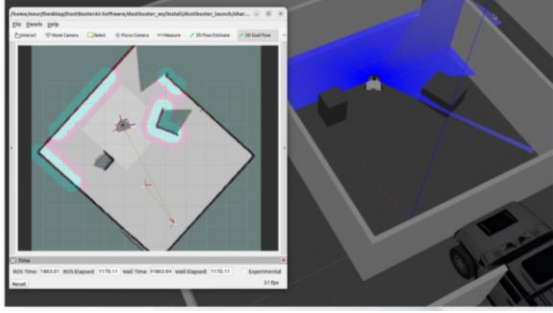


Şekil 15. ROS Cartographer SLAM ile algılayıcı verilerin yorumlanması, lokalizasyon ve haritalama yapılması.

belirlenmekte ve gerekliyse (dinamik engellerde) yeni rota belirlenmesi gerçekleştirilmektedir. ROS Nav2 paketi yardımıyla adaptif Monte Carlo yaklaşımları ile lokal ve global navigasyon haritaları güncellenmekte ve hedefe ulaşmak için en uygun yol belirlenmekte ve uygulanmaktadır (Şekil 16). Buradan gereken hız bilgisi içeren kontrol sinyali oluşturulur. Oluşturulan plan doğrultusunda hedefe ulaşmak için tahrik sisteminin kullanılmaktadır. Bunun için DC motor, tekerlek ve PID kontrol sistemi kullanılmıştır (Şekil 17).

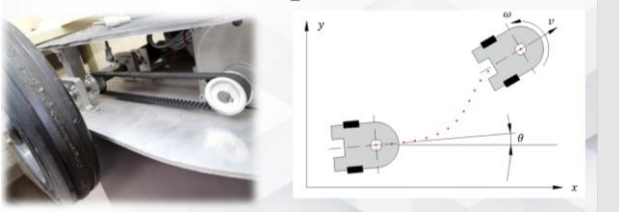


Şekil 16. Genetik algoritma ile robot yörüngesi planlaması.



Şekil 17. Elde edilen rota planlaması kullanılarak simülasyonda robot temizlik fonksiyonunu gerçekleştirmektedir.

Robotun hareketi DC motorlara bağlı kayış ksnak mekanizması ile gerçekleştirilmektedir. Robotun ileri hızı ve dönüş hızı için gereken sol ve sağ tekerlek hızları (1) ve (2) ile hesaplanabilir.



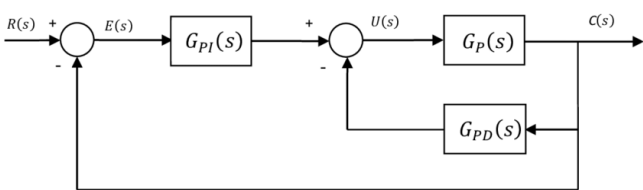
Şekil 18. Robot tahrik sistemi ve robot kinematik modeli

$$v_{sol} = \frac{1}{2r} (2v - \omega L) r \quad (1)$$

$$v_{sağ} = \frac{1}{2r} (2v + \omega L) r \quad (2)$$

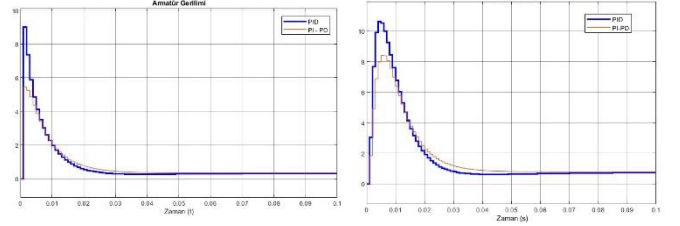
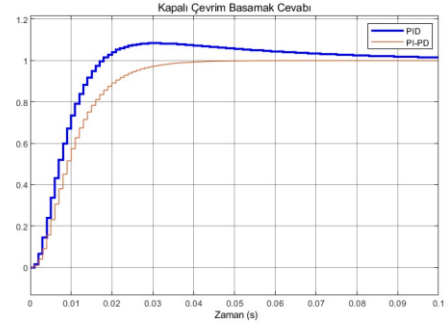
Motor kontrolü için DC motor modeli kullanılmıştır. Buradan elde edilen elektriksel ve mekanik transfer foksionları istenen hızı elde etmek için bir simülink bloğunda kullanılmıştır. Burada dişli oranı, voltaj değeri kısıtı, motor ve sürtünmeler dikkate alınmıştır.

Kapalı çevrim kontrolcü davranışları incelendiğinde armatür gerilimi ve armatür akımı değerinin yüksek olduğu görülmüş ve sürekli zamanda kutup-sıfır dağılımı değiştirilerek PID kontrolcü yeniden tasarlanarak alternatif bir PI-PD kontrol sistemi (Şekil 19) uygulanmıştır. ($K_p = 9.9131$, $K_i = 212.256$, $K_d = 0.01084$)



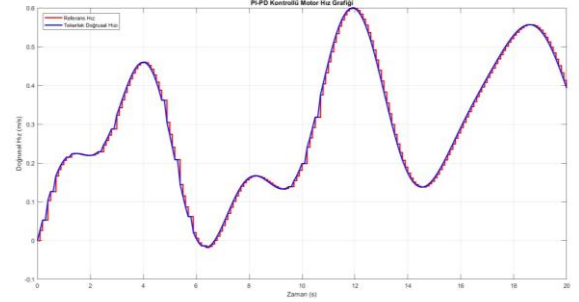
Şekil 19. PI-PD kontrol tasarımı

Yapılan analizler PI-PD kontrol yapısının PID'ye göre daha iyi performans verdiğini ve armatür gerilim ve akımının daha düşük olduğunu göstermektedir (Şekil 20).



Şekil 20. PI-PD kontrol tasarımı ile PID kontrolcünün karşılaştırılması.

Uygulanan PI-PD kontrol yapısı tekerlek referans hızını yüksek doğrulukta takip edebilmektedir (Şekil 21).



Şekil 21. PI-PD kontrol yapısının motor hız grafiği.

IV. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Simülasyon ortamındaki deneylerden sonra robot laboratuvar içinde çeşitli deneyler ile denenmiştir. Robotun vakum sistemi ve kontrol sisteminin istenen şekilde performans gösterdiği görülmüştür.



Şekil 22. Laboratuvar temizleme, haritalama ve navigasyon deneyleri

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada otonom vakumlu temizlik robotunun tasarımı gerçekleştirildi. Fusion 360 kullanılarak vakum sistemi tasarımı yapıldı ve Autodesk CFD 2023 ile akış analizi gerçekleştirildi. Tasarım, 3D printerda imal edilerek fiziksel

olarak elde edildi. Bu sayede teorik tasarımın somut bir prototipe dönüştürülmesi sağlandı.

Robotik yazılım çatısı olarak ROS2 (Robot Operating System 2) kullanıldı ve DustBusterAI 1.0 adı verilen yazılım geliştirildi. Bu yazılım, robotun yönetimi ve kontrolü için tasarlandı. LIDAR, enkoder ve IMU gibi algılayıcılar kullanılarak robot tarafından hassas veri toplama işlemleri gerçekleştirildi. Bu algılayıcılar, robotun çevresini algılaması ve doğru konumlandırma yapması için kullanıldı. Karar verme aşamasında geliştirilen yapay zeka, genetik algoritmalar temel alınarak tasarlandı. Bu sayede robot, çevresel verileri analiz ederek optimize edilmiş kararlar alabildi. Kontrol sistemi tasarımı yapıldı ve robot şasesine elektronik ve 3D yazıcı ile üretilen parçalar monte edildi. Robotun hareketi ve navigasyonu başarıyla kontrol edildi. Vakum sistemi, ileriki versiyonlarda geliştirilebilecek bir potansiyele sahiptir. Daha fazla deneysel çalışma ve iyileştirme yapılabilecek bir platform ortaya çıkartılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] R. A. Heinlein, "The Door into Summer", New York: Signet. pp. 20-21, 1957.
- [2] "Invention of Robotic Vacuum Cleaners". Vacuum Cleaner History. Erişim tarihi: 2018-03-05.
- [3] History | iRobot". www.irobot.com. Erişim tarihi: 2021-05-12.
- [4] H. Sahin, L. Guvenc, "Household robotics: autonomous devices for vacuuming and lawn mowing [applications of control]", IEEE Control Systems Magazine, 27(2), 20-96, 2007.
- [5] Y. Hong, R. Sun, R., Lin, S. Yu, & L. Sun, "Mopping module design and experiments of a multifunction floor cleaning robot", In Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (pp. 5097-5102). IEEE, 2014.
- [6] M. A. Jaradat, M. Tauseef, Y. Altaf, R. Saab, H. Adel, N. Yousuf, & Y. H. Zurigat, "A fully portable robot system for cleaning solar panels", in 2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA) (pp. 1-6). IEEE.
- [7] N. K. Memon, "Autonomous vehicles for cleaning solar panels", in 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 633-637). IEEE, 2016.
- [8] N. Mir-Nasiri, H. Siswoyo, & M. H. Ali, "Portable autonomous window cleaning robot", Procedia computer science, 133, 197-204, 2018.
- [9] E. Prassler, A. Ritter, C. Schaeffer, P. Fiorini, "A short history of cleaning robots", Autonomous Robots, 9(3), 211-226, 2000.
- [10] S. J. Ohrem, E. Kelasidi, N. Bloecher, "Analysis of a novel autonomous underwater robot for biofouling prevention and inspection in fish farms", in 2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) (pp. 1002-1008). IEEE, 2020.
- [11] Y. Wang, J. Zhang, "Autonomous air duct cleaning robot system", in 2006 49th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (Vol. 1, pp. 510-513). IEEE, 2006.
- [12] N.A. Andersen, I.D. Braithwaite, M. Blanke, T. Sorensen, "Combining a novel computer vision sensor with a cleaning robot to achieve autonomous pig house cleaning" in Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control (pp. 8331-8336). IEEE, 2005.
- [13] Lely (Erişim tarihi: Kasım 2022). Lely Discovery Collector. <https://www.lely.com/solutions/housing-and-caring/discoverycollector/>
- [14] T. Ichimura, T., & S. I. Nakajima, "Development of an autonomous beach cleaning robot, Hirottaro", 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (pp. 868- 872). IEEE, 2016.
- [15] H. Zhang, W. Wang, R. Liu, J. Zhang, & G. Zong, G., "Locomotion realization of an autonomous climbing robot for elliptic half-shell cleaning", in 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 1220-1225). IEEE, 2007.
- [16] H. Parmar, A. Meena, J. Bhovaniya, M. Priyadarshi, "Automatic smart mop for floor cleaning", int RJ Eng Technol (IRJET), 6(4), 3159- 3165, 2019.
- [17] M. R. Khan, N. M. L. Huq, M. M. Billah, & S. M. Ahmmad, "Design and Development of Mopping Robot-'HotBot". In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 53, No. 1, p. 012008). IOP Publishing, 2013.
- [18] A. Rai, C. Chaturvedi, P. K. Maduri, K. Singh, "Autonomous Disinfection Robot", in 2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN) (pp. 990-996). IEEE, 2020.
- [19] N. Western X. Kong M. S. Erden, "Design of a train cleaning robot for the train carriage interior", 31st CIRP Design Conference 2021 (pp. 804-809), 2021.
- [20] T. B. Asafa, T. M. Afonja, E. A. Olanian, H. O. Alade, "Development of a vacuum cleaner robot", Alexandria engineering journal, 57 (4), 2911-2920, 2018.
- [21] E. S. Keneth, A. Kamyshny, M. Totaro, L. Beccai, S. Magdassi, "3D printing materials for soft robotics". Advanced Materials, 33(19), 2003387, 2021.
- [22] H. Nguyen, N. Adrian, J. L. X. Yan, J. M. Salfity, W. Allen, Q. C. Pham, "Development of a robotic system for automated decaking of 3d-printed parts", in 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 8202-8208). IEEE, 2020.
- [23] A. Akkız, "Mobil otonom kütüphane robotunun tasarımı ve kontrolü", Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı / Mekatronik Mühendisliği Bilim Dalı, 2019.
- [24] E. Becer, O. Ulusoy, K. Turan, "Alışveriş Merkezi, Havaalanı veya Depo gibi Geniş Kapalı Alanlarda Çalışacak Otonom bir Temizlik Robotu Tasarımı", Bitirme Tasarım Projesi, İTÜ Makine Fakültesi, Haziran 2023.
- [25] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison, and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," in IEEE international conference on rehabilitation robotics, pp. 1– 7, 2011.
- [26] A. Censi, A. Franchi, L. Marchionni, and G. Oriolo, "Simultaneous calibration of odometry and sensor parameters for mobile robots," IEEE Transactions on Robotics, vol. 29, no. 2, pp. 475–492, 2013, doi: 10.1109/TRO.2012.2226380.
- [27] X. Wang, H. Pan, K. Guo, X. Yang, and S. Luo, "The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 502, p. 012008, Jun. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/502/1/012008.
- [28] A. Koubaa, Robot operating system (ROS): The complete reference (volume 1), 1st ed. Cham, Switzerland: Springer, 2016.
- [29] W. Maddern, G. Pascoe, and P. Newman, "Leveraging experience for largescale LIDAR localisation in changing cities," in 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), 2015, pp. 1684–1691. doi: 10.1109/ICRA.2015.7139414.
- [30] Cartographer: Open source SLAM for robots. <https://github.com/cartographerproject/cartographer>.
- [31] M. Mitchell, An introduction to genetic algorithms. MIT Press, 1998.
- [32] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley, 1989.
- [33] S. Russell and P. Norvig, Artificial intelligence: A modern approach. Pearson, 2016.
- [34] S. M. LaValle, "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," in IEEE international conference on robotics and automation, 2001.
- [35] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, Simulation and the monte carlo method. John Wiley & Sons, 2016.