

Çok Yönlü ve Tekrar Yapılandırılabilir Mikro Montaj İş İstasyonu

Emrah Deniz Kunt¹, Ahmet Teoman Naskali², Kazım Çakır³, Asif Sabanovic⁴, Ebubekir Yüksel⁵

^{1,2,3,4} Mekanik Mühendisliği
Sabancı Üniversitesi, İstanbul
{edkunt¹, teoman²}@su.sabanciuniv.edu
{kcakir³, asif⁴}@sabanciuniv.edu

⁵Çevre Mühendisliği Bölümü
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli
yuksele@gyte.edu.tr

Özetçe

Bu makalede, mikro montaj ve mikro manipülasyon süreçlerindeki sorunların incelenmesi amacıyla bir araştırma aracı olarak tasarlanan ve geliştirilen çok yönlü ve tekrar yapılandırılabilir mikro montaj iş istasyonu ve yine aynı grup tarafından geliştirilen bir önceki sistem üzerinde mekanik ve denetim yapıları açısından yapılan geliştirmeler sunulmaktadır. Bu geliştirmeler; (i) daha karmaşık montaj ve manipülasyon işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için ek bir manipülatör modülünün eklenmesi, (ii) sistemi daha yetenekli kılabilmek için görü sistemi ve numune taşıyıcı platformlarına ek hareket serbestlik derecesi eklenmesi (iii) mikro dünyanın görüntülenmesi ve montajı yapılacak veya manipüle edilecek parçaların konum ve yönelimlerinin belirlenebilmesi amacıyla görü sistemi olarak yeni bir optik mikroskobun eklenmesi (iv) daha fazla serbestlik derecesinin denetimini sağlayabilmek amacıyla varolan sistemin daha modüler bir denetim sistemi donanımı ile değiştirilmesi gibi unsurları içermektedir. Ayrıca sistemde kumandalı, yarı otomatik ve görü bazlı yöntemler aracılığı ile tamamen otomatik çalışma modlarında yapılan deney sonuçları da sunulmaktadır.

1. Giriş

Mikrosistem üretim teknolojilerindeki gelişmeler ve ürünlerin mikron seviyelerine minyatürleştirilmeleri sonucunda karmaşık melez mikrosistemlerin oluşturulabilmesi amacıyla montaj sürecine büyük bir ihtiyaç duyulmaktadır. Manipüle edilecek parçaların boyutlarının küçük olması, yüksek hassasiyet gereksinimi ve bu alanda mikro dünyaya özgü birtakım sorunların hala çözülmemiş olması nedeniyle, değişik üretim teknolojileri kullanılarak üretilmiş farklı malzeme özelliklerine sahip mikro bileşenlerin tümleştirilmesi hala çözülmesi gereken önemli bir sorundur. Montaj süreci gereksinimi, farklı özelliklere sahip parçaları almak, yönlendirmek, hareket ettirmek ve bırakmak gibi işlemleri düzgün bir şekilde yerine getirebilecek esnek, modüler ve hassas mekanizmalar gerektirmektedir. Bir ürün bünyesinde farklı işlevler farklı malzeme gereksinimine ihtiyaç duyulmasına yol

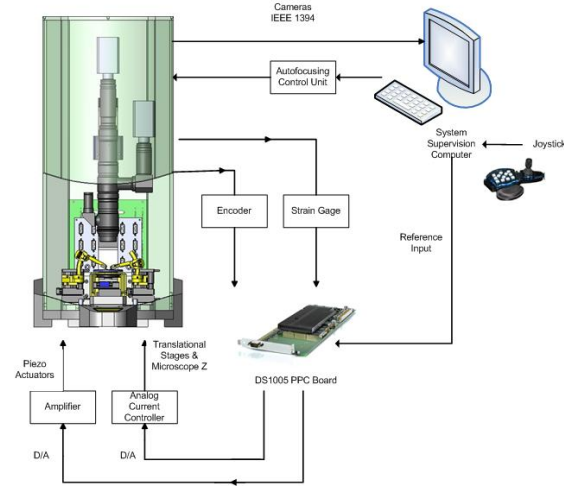
açmakta ve bu da montaj işlemini ürün oluşturma sürecinde kaçınılmaz kılmaktadır.

Mikro montaj sistemleri geliştirmeye yönelik birçok araştırma yürütülmüş ve halen de yürütülmektedir. Bu bağlamda, [1] [2] ve [3]'te montaj işlemleri otomatik olarak kontrol edilen mikro robotlar tarafından gerçekleştirilen, esnek mikro robot tabanlı masa üstü mikro montaj istasyonları sunulmuştur. [5] ve [6]'da sunulan 5 serbestlik dereceli manipülatör sistemi üzerine geliştirmeleri içeren 3 boyutlu MEMS mikroyapıların montajında kullanılmak üzere 6 serbestlik dereceli robotik manipülatör [4]'te sunulmuştur. [7]'de aynı 6 serbestlik dereceli robotik sistem kullanılarak MEMS aygıtların görü tabanlı geri besleme denetim sistemi kullanılarak mikro montaj otomasyonu sunulmuştur. [8]'de biyo-mikro robotların otomatik montajının gerçekleştirildiği 4 serbestlik dereceli taban ünitesi, 2 serbestlik dereceli üst ünite ve aydınlatma kubbesiyle birlikte CCD kameralı 3 mikroskobun kullanıldığı bir mikro montaj sistemi sunulmuştur. [9]'da stereo mikroskop görü sistemi altında farklı çeşitlerde mikro uç takımları kullanılarak çoklu manipülatör işbirliği ile gerçekleştirilen mikro montaj görevleri tanıtılmıştır.

Bu makalede, mikro bileşenlerin manipülasyonu ve montajı için çok yönlü ve yeniden yapılandırılabilir bir denetleme ve manipülasyon sistemi önerilmektedir. Daha önce mikro manipülasyon ve montaj işlemleri için tek manipülatörlü bir sistem [10]'da sunulmuştur. Bu sistem üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve çalışmalar, görevlerin işbirliği içerisinde gerçekleştirilebilmesi için ek bir manipülatör sistemi, numune tablası için ek bir dönel hareket eksenini, varolan denetleyici donanımının daha çok sayıda eksen denetimine olanak sağlayacak modüler bir sistemle değiştirilmesi ve odaklama, büyütme işlemlerinin otomatik olarak kontrol edilmesine olanak sağlayacak yeni bir optik mikroskop gibi unsurların gereksinimini doğurmuş ve yeni sistemde bu değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Görü sistemi ayrıca değişken büyütme olanağı sağlayan detaylı bir görüntü ve ortamın geniş çaplı görüntülenmesi amacıyla global bir görüntü sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Önceki sisteme ek olarak gerçekleştirilen bu iyileştirmeler ile sistem daha karmaşık montaj ve manipülasyon işlemlerini gerçekleştirebilmeye uyumlu hale getirilmiştir.

2. Mikro Montaj İş İstasyonu

İş istasyonunun genel işlevsel yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir. Geliştirilen sistem her bir manipülatör sistemine eklenebilen uç takımlarının değiştirilebilir olmasına olanak sağlaması nedeniyle geniş çapta değişiklik gösteren görevlerin gerçekleştirilebilmesi için bir ortam (konumlandırma ve görüntüleme) sağlamaktadır. Sistem manipülasyon bazında 9 serbestlik derecesine ve görü sisteminde de 3 serbestlik derecesine sahiptir. Sistem eklenecek takım uçlarının çeşidine göre sistemdeki toplam serbestlik derecesi artı yönde değişim gösterebilmektedir.



Şekil 1: Sistem İşlevsel Yapısı.

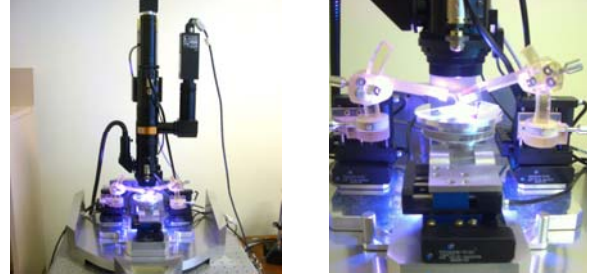
2.1. Manipülasyon Sistemi

Manipülasyon sistemi 3 hareket serbestliğine sahip iki adet takım tutuculu mikro manipülasyon sisteminden oluşmaktadır. Her bir manipülatör kartezyen xyz şeklinde düzenlenmiş nanometre tasarım çözünürlüğünde 3 doğrusal hareket platformundan oluşmaktadır. [10]’da sunulan sistem mikro montaj istasyonunun ilkörneğini oluşturmakta ve kaba ve hassas hareket platformlarından oluşturulmuş tek bir manipülatör sistemi içermektedir. Sistemde kullanılan doğrusal hareket platformlarının yeterli hassasiyeti ve hareket menziline sağlanması nedeniyle bu düzenleme değiştirilmiştir. İşbirlikçi hareket sağlanarak daha karmaşık montaj ve manipülasyon işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için aynı yapıya sahip ikinci bir manipülatör sistemi iş istasyonuna eklenmiştir. Bu sayede, örnek olarak; bir hücre uygun bir takım ucu ile desteklenirken başka bir uç ile de manipüle edilebilmektedir.

Sistemde ayrıca numune tablasının hareketlendirilerek tabla yüzeyinin farklı bölgelerinin mikroskobun görüş alanına girmesini sağlayarak numunenin daha verimli olarak kullanılmasını etkin kılan 3 hareket serbestlik derecesine (x,y,θ) sahip numune konumlandırma platformu bulunmaktadır. Dönel platform, kartezyen xy hareket sistemi üzerine tasarlanmıştır ve 45 nano derece çözünürlüğe sahiptir. Platform tasarımı 20mm’lik açıklığı sayesinde alttan ışıklandırmaya olanak sağlamaktadır.

Sistemde farklı takım uçları ve bunlara ait uyarlayıcı fikstürler

değişimli olarak kullanılabilir. Mikrotutucular, problemler ve diğer manipülasyon uçları seçeneklerden bazılarını oluşturmakta ve bunların sisteme bütünleştirilmesi için gerekli fikstürler de tasarlanmıştır. Çevre titreşimlerinden etkilenmemesi için bütün sistem etkin titreşim sönümlendirme masası üzerine yerleştirilmiştir. Sistem Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2: İş İstasyonu.

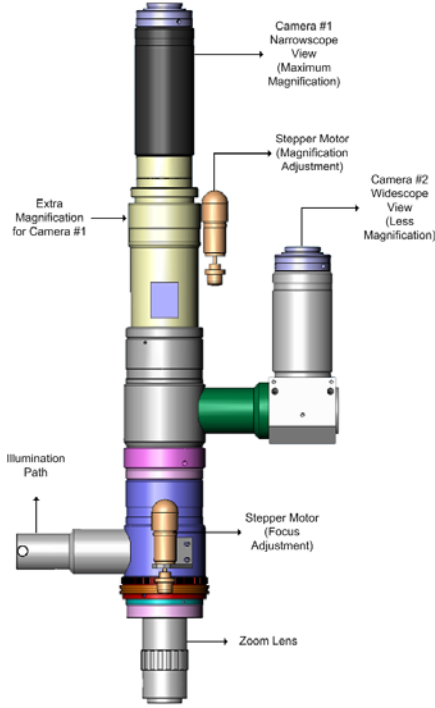
2.2. Görü Sistemi

Görü sistemi mikro dünyanın net bir şekilde görüntülenmesini sağlamak ve manipüle edilecek parçaların konum ve yönelim bilgilerinin belirlenmesini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Donanımla tümleşik bir şekilde, görü sistemi için tasarlanan kullanıcı ara birimi, çalışma alanının kaba ve hassas görüntüleri, gerçekleştirilecek görevin gerektirdiği büyütme değerlerini ayarlanması, net görüntü ve derinlik bilgisinin elde edilebilmesi amacıyla otomatik odaklama gibi işlevselliklere sahiptir. Ayrıca görü sistemi, ilgi alanları arasındaki bağıl mesafeleri hesaplayarak ve bunları gerekli hareket bilgisini hareket platformlarına ileterek görsel geri besleme ile görevlerin otomatik olarak gerçekleştirilmesine de olanak sağlamaktadır. Sistemde kullanılan optik mikroskop 0.7 µm çözünürlüğe, 4x-800x görsel büyütmeye sahip olup, kaba ve hassas görüntüler için iki adet CCD kamera içermektedir. (Şekil 3)

Sistemde görü sistemi olarak kullanılan optik mikroskop mikro montaj ve manipülasyon gereksinimleri göz önünde bulundurularak seçilmiş ve yapılandırılmıştır. Çalışma alanının global görüntüsünü sağlamak amacıyla biri sabit büyütmeye sahip, çalışma alanının ve nesnelerin detaylı görüntüsünü sağlamak amacıyla diğeri de değişken büyütme seçeneği içeren iki farklı optik yol içerecek şekilde düzenlenmiştir. Böyle bir özelliğin eklenmesi numune tablası üzerinde dağınık durumda olan parçaların konumlarının belirlenerek istenilen manipülasyon konumuna getirilebilmelerini sağlamaktadır. Ayrıca yüksek büyütme oranlarıyla montaj ve manipülasyon işlemleri daha hassas bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Sistemin tam olarak otomatik olması amacıyla mikroskop üzerindeki odaklama ve büyütme ayarları da step motorlar aracılığıyla otomatize edilmiştir.

Görü sistemi için aydınlatma en önemli unsurudur. İşlenecek parçaların konumlarının ve geometrilerinin belirlenmesi amacıyla sistemde görüntü işleme teknikleri kullanılması gerektiğinden aydınlatma tekniğinin dikkatli bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Örnek olarak görüntüde oluşabilecek gölgelerin parçanın geometrisinin yanlış çıkartımına yol açması manipülasyon veya montaj işleminin başarısızlıkla sonuçlanmasına yol açabilir. Bu nedenle sistemde iki ayrı aydınlatma sistemi

kullanılmıştır; (i) alttan aydınlatma için RGB Led aydınlatıcı (ii) mikroskopun optik yolundan sağlanan üstten aydınlatıcı. İki aydınlatma sistemi de sistem bilgisayarından kontrol edilebilmektedir.



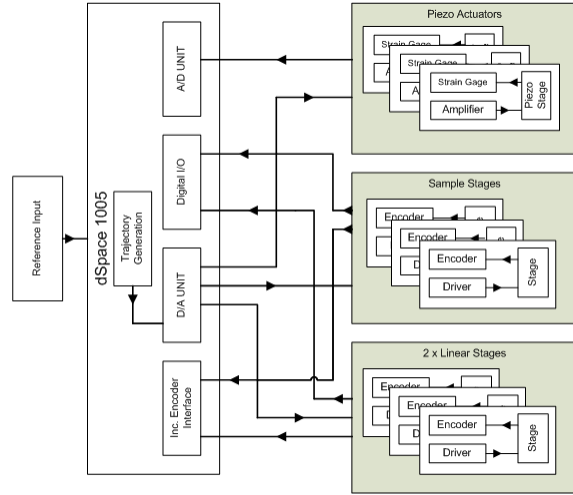
Şekil 3: Optik Mikroskop Yapısı

2.3. Sistem Gözetimi

Denetim sistemi iki parçadan oluşmaktadır; görü bilgisayarı ve gerçek zamanlı dSpace 1005. Gerçek zamanlı bilgisayar 10kHz örnekleme hızına sahip olup sistemdeki bütün gerçek zamanlı işlemleri gerçekleştirmektedir. Her bir örnekleme periyodunda sistemdeki bütün hareket platformlarının konumu edinilmekte, hız değerleri hesaplanıp filtrelenmekte, görü sisteminden edinilen referans değerleri alınıp sistem çıktılarını SMC (kayan kipli denetleyici) denetleyicilerle hesaplanarak akım referansları hareket platformlarına verilmektedir.

Bu mimari üzerinde, birkaç örnekleme periyodu süresince (mesafeye ve platformların minimum hızlarına bağlı olarak) çalışan her bir manipülötör grubunun, doğrusal hareket platformlarına verilen kontrol çıktısını ölçeklendirerek ve hareket zamanını en yavaş üyeye göre belirleyerek, doğrusal bir hareket yapmalarını sağlayan gezinme algoritması çalışmaktadır. Sistemin bütün fonksiyonları işlevsel bir şekilde yazılmış olup yeni hareket platformları ya da eyleyiciler sistemde yeni modüller olarak tanımlanabilmekte, eşzamanlı hareket gereksiniminde diğer modüllerle gruplanabilmektedir. Gerçek zamanlı bilgisayar karmaşık bir GUI'ye (kullanıcı ara birimi) ihtiyaç duymaksızın farklı kaynaklardan verilen referanslar ile sistem sürülebilme ve farklı platformlardan kumanda edilebilmektedir. Sistem için tasarlanan GUI C# ortamında yazılmış ve Halcon görüntü işleme kütüphanesini kullanmaktadır. Yazılımın modülerliği ve yapılandırılabilirliği sistem üzerinde C++ ve OpenCV gibi

farklı platformlar kullanılarak da deneyler yapılabilmesine izin vermektedir. Denetim yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Denetim Yapısı

Görü bilgisayarı kameradan görüntüleri yakalamak ve görüntü üzerinde bağıl konumları hesaplamak, kullanıcıdan istenen girdileri manipülötör sistemi için doğrudan konum koordinatları veya "parçayı x konumuna götür" gibi daha üst düzey fonksiyonlar olarak alıp imge koordinatlarını dünya koordinatlarına aradaki eşleme değerlerine göre dönüştürerek gerçek zamanlı bilgisayara iletmekle görevlendirilmiştir. Kamera performansına göre görü sistemi 22 ve 30 Hz arası çalışabilmektedir.

Kullanıcı ile sistem arasındaki ana etkileşim modülü olarak sistemin bütün özelliklerinin kontrol edilebildiği bir kullanıcı ara birimi tasarlanmıştır. Bu ara birim aşağıdaki ana bloklardan oluşmaktadır;

- Mikroskop tarafından edinilen görsel bilgi
- Bütün sistemin o anki durumunun sunuşu
- Sistemdeki her bir serbestlik derecesinin o anki konumu
- İstenilen görevin yerine getirebilmek için kullanıcının komut modülü
- Belirli derecede sistem tanısına olanak sağlama

Kullanıcının sistem bilgilerini denetleyebilmesine olanak sağlamak amacıyla kullanıcı ara birimi herbiri sistemin belirli görevlerine adanmış ekran kümesi olarak tasarlanmıştır. Kullanıcı GUI aracılığıyla iş istasyonunun hemen hemen bütün özelliklerini gözlemleyebilme ve müdahale edebilme yetisine sahip olmaktadır. İstenilen hareket komutları sisteme CCD kameralar aracılığıyla sağlanan görüntüler üzerinde gidilmek istenen noktaya tıklanarak verilebilme veya bir kumanda kolu aracılığıyla da sistem hareketlendirilebilmektedir. Görü sistemine ait olan odaklama, büyütme gibi özelliklerde kullanıcı ara birimi üzerinden ayarlanabilmektedir.

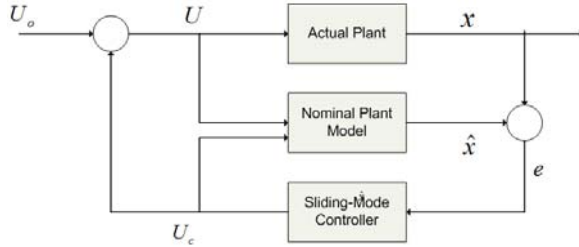
2.4. Hareket Denetimi

Montaj işlemlerinin hassasiyet ve doğruluklarının büyük oranda denetim performansına bağlı olması nedeniyle hareket denetimi mikro montaj iş istasyonu için en önemli temel faktörü oluşturmaktadır. Hareket denetim sisteminin doğrusal

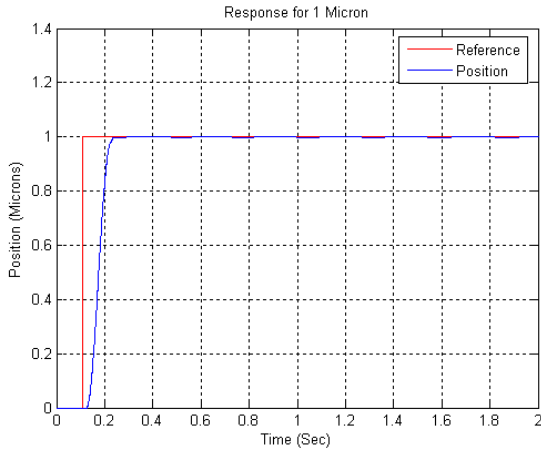
ve dönel platformlar, piezo eyleyiciler de olmak üzere bütün elemanları sürtünme ve histerez, vs. nedeniyle yüksek bozucu etkenlere maruz kalmaktadır. Gürbüz bir denetim sistemi elde edebilmek için sistemde bulunan bozucu etkenlerin reddedilmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda bozucu etken gözlemcileri kullanılmaktadır. Bu gözlemcinin çıktısı sistemde bulunan bozucu etkenlere karşı etkide bulunmak amacıyla denetim girdisine beslenmektedir.

Şekil 5'te gösterilen yapı sistemde bulunan her serbestlik derecesine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar tatminkar olmuştur.

Hareket denetiminde kullanılan denetim algoritmaları kayan kipli denetim (SMC) yöntemlerine dayanmaktadır. Kayan kipli kontrol, önceden belirlenmiş bir küme anahtarlama yüzeylerine ulaşmaya yönelik yapı değiştiren süresiz bir denetleme aksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu denetleme, yapısı içerisinde muhteva ettiği bozucu etken reddetme sayesinde modellenmemiş dinamikleri telafi ederek ve bunun sonucunda yüksek hassasiyet ve hızlı tepki elde edilmesi olasılığı yaratan gürbüz bir sistem ortaya çıkarabilmektedir. Hareket platformlarının adım tepkileri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Algoritma hakkında detaylı bilgi ve elde edilen sonuçlar [10] ve [11]'de bulunabilir.



Şekil 5: Sistem İşlevsel Diagramı.

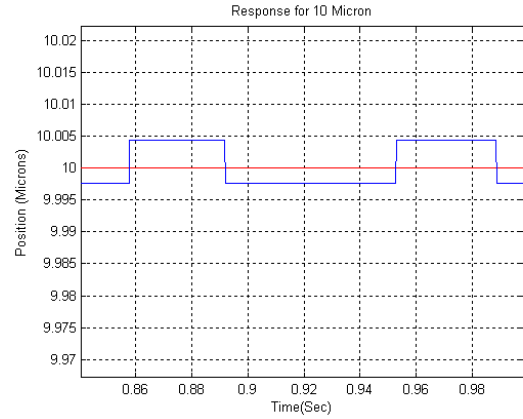


Şekil 6: Hareket Platformlarının 1µm adım tepkisi.

3. Deneyler ve Sonuçlar

Sistemin güvenilirliğinin test edilmesi amacıyla kumandalı, yarı otomatik ve görsel tabanlı tam otomatik modlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu makalede açıklanan deneylerde 50 µm çapında polystyrene küreler ve çeşitli manipülasyon araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

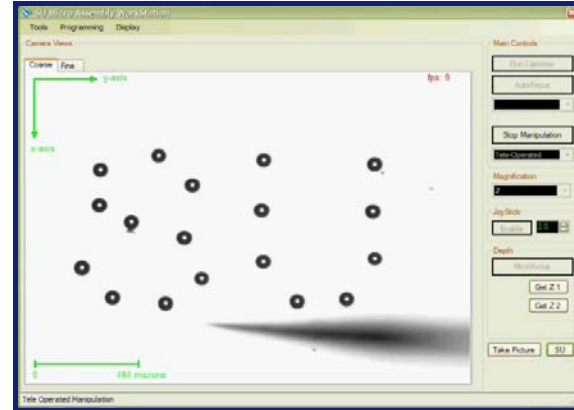
Kumandalı mikro montaj işlemleri iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir; ekran üzerinde fare ile komut verilerek ve



Şekil 7: Tasarım Çözünürlüğü (Bir kodlayıcı darbesi).

kumanda kolu kullanılarak. Yarı otomatik mikro montaj işlemleri kullanıcının belirli bir kapsamda müdahalesini içermektedir. Kullanıcı manipüle edilmesini istediği parçayı ve hangi noktaya hareket ettirilmesini istediğini belirtmekte ve geri kalan işlemler sistem tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

İş istasyonunu için geliştirilen kullanıcı ara birimi aracılığıyla, kumandalı kontrol modunda, manipülatör aracı olarak tungsten mil ve 50 µm çapında mikro küreler kullanılarak Sabancı Üniversitesi'nin ilk harfleri oluşturulmuştur. (Şekil 8)

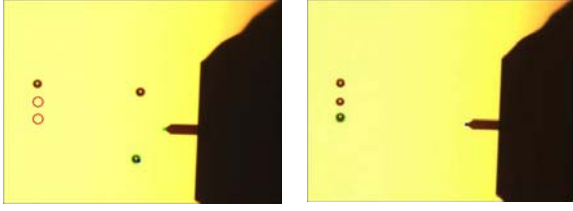


Şekil 8: SU Şablonu Oluşturulması.

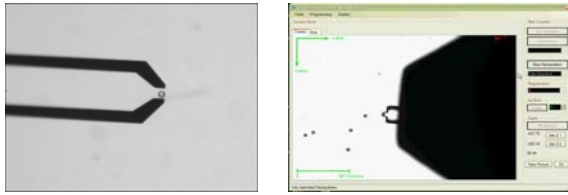
Çeşitli klasik görsel servolama metodları da sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Optimal kontrol kullanılarak piksel hatası ve kontrol sinyal büyüklüğünün cezalandırıldığı imge tabanlı bir görsel servolama algoritması, 50 µm çaplı küreleri iterek doğrusal bir şablon oluşturmak için gerçekleştirilmiştir. (Şekil 9) Mikro kürelerin hassas bir şekilde konumlandırılabilmesi için AFM (atomik kuvvet mikroskobu) probu ucunun ve kürelerin algılanabilmesi amacıyla bir öznitelik özütleme algoritması geliştirilmiştir. Ayrıca, konumlandırılacak kürelerin önceliklerinin belirlenmesi ve engellerden kaçınılmasını sağlamak amacıyla da gezinge planlaması algoritması tasarlanmıştır.

İş istasyonunu çeşitli uç takımlarının kolayca sisteme bütünleştirilebileceği ve manipülasyon aracı olarak

kullanılabileceği bir şekilde tasarlanmıştır. Sistemde çeşitli mikro tutucular kullanılarak tutma-bırakma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. (Şekil 10) İş istasyonu ayrıca mikro pipetler ve problar kullanılarak hücre manipülasyonu deneyleri için de kullanılmaktadır.



Şekil 9: Görsel Tabanlı Metodlarla Doğrusal Şablon Oluşturulması.[12]



Şekil 10: Mikrotutucu Deneyleri.

4. Sonuçlar

Bu makalede, mikro montaj ve mikro manipülasyon süreçlerindeki sorunların incelenmesi amacıyla bir araştırma aracı olarak tasarlanan ve geliştirilen çok yönlü ve tekrar yapılandırılabilir mikro montaj iş istasyonu sunulmuştur. Daha karmaşık montaj ve manipülasyon görevlerinin yerine getirilebilmesi amacıyla [10]'da sunulan sisteme ek olarak yapılan geliştirmeler belirtilmiştir. İş istasyonunun mekanik ve denetim yapısıyla ilgili detaylı bilgiler de verilmiştir.

Ek olarak, iş istasyonunun işlevselliğini göstermek amacıyla yapılan deneylerden çeşitli örnekler verilmiştir. Deneyler sistemde kumandalı, yarı otomatik ve görsel tabanlı tam otomatik modlarda gerçekleştirilmiştir. Deneyler göstermektedir ki; sistem hassasiyet, doğruluk ve güvenilirlik açısından iyi sonuçlar vermektedir.

5. Teşekkür

Bu çalışma DPT 2003k120530 no'lu proje tarafından desteklenmiştir. Ayrıca ilk ve ikinci yazarlar Yousef Jameel Bursu tarafından sağlanan destek için de teşekkür eder.

6. Kaynakça

- [1] Fatikow, S.; Seyfried, J.; Fahlbusch, S.; Buerkle, A.; Schmoeckel, F., "A flexible microrobot-based microassembly station," *Emerging Technologies and Factory Automation, 1999. Proceedings. ETFA '99. 1999 7th IEEE International Conference on*, vol.1, no., pp.397-406 vol.1, 1999
- [2] Woern, H.; Seyfried, J.; St. Fahlbusch; Buerkle, A.; Schmoeckel, F., "Flexible microrobots for micro assembly tasks," *Micromechatronics and Human Science, 2000.*

- [3] Fatikow, S.; Rembold, U., "An automated microrobot-based desktop station for micro assembly and handling of micro-objects," *Emerging Technologies and Factory Automation, 1996. EFTA '96. Proceedings., 1996 IEEE Conference on*, vol.2, no., pp.586-592 vol.2, 18-21 Nov 1996.
- [4] Dechev, N.; Lu Ren; Liu, W.; Cleghorn, W.L.; Mills, J.K., "Development of a 6 degree of freedom robotic micromanipulator for use in 3D MEMS microassembly," *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, vol., no., pp. 281-288, May 15-19, 2006H. Simpson, *Dumb Robots*, 3rd ed., Springfield: UOS Press, 2004, pp.6-9.
- [5] N. Dechev, W. L. Cleghorn, James K. Mills, "Microassembly of 3-D MEMS Structures Utilizing a MEMS Microgripper with a Robotic Manipulator", *Proc. of IEEE ICRA 2003*, Taipei, Taiwan, Sept 2003.
- [6] N. Dechev, W. L. Cleghorn, James K. Mills, "Microassembly of 3DMicrostructures Using a Compliant, Passive Microgripper", *Journal of Microelectromech. Systems*, vol. 13, no. 2, April 2004.
- [7] Anis, Y.H.; Mills, J.K.; Cleghorn, W.L., "Automated Microassembly Task Execution Using Vision-Based Feedback Control," *Information Acquisition, 2007. ICIA '07. International Conference on*, vol., no., pp.476-481, 8-11 July 2007.
- [8] M. Probst, K. Vollmers, B. E. Kratochvil, B. J.Nelson, "Design of an Advanced Microassembly System for the Automated Assembly of Bio-Microrobots," in *Proceedings of 5th International Workshop on Microfactories*, 2004.
- [9] Xinhuan Huang; Xiadong Lv; Min Wang, "Development of A Robotic Microassembly System with Multi-Manipulator Cooperation," *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1197-1201, 25-28 June 2006
- [10] Kunt, E.D.; Cakir, K.; Sabanovic, A., "A workstation for microassembly," *Control & Automation, 2007. MED '07. Mediterranean Conference on*, vol., no., pp.1-6, 27-29 June 2007
- [11] Khan, S.; Elitas, M.; Kunt, E.D.; Sabanovic, A., "Discrete Sliding Mode Control of Piezo Actuator in Nano-Scale Range," *Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1454-1459, 15-17 Dec. 2006
- [12] Bilen, H.; Unel, M., "Micromanipulation Using A Microassembly Workstation with Vision and Force Sensing," in press, *ICIC 2008. International Conference on Intelligent Computing*, Shanghai, China, Sept. 15-18, 2008.