

Bir Manyetik Mikromanipülâtör ve Kontrolü

Günyaz Ablay^{1*}, Mustafa Büyük¹ ve Yakup Eroğlu¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Abdullah Gül Üniversitesi, Türkiye
*(gunyaz.ablay@agu.edu.tr)

Özet –Bir manyetik mikromanipülâtör farklı uygulamalar için gerekli manyetik kuvveti üretme kabiliyetine sahip olarak geliştirilebilir ve mikron boyutlu parçacıkları manipüle edebilir. Bu çalışma etkin ve otomatik mikro-parçacık manipülasyonu için geribeslemeli kontrol yapılarından oluşan ve yatay ekseninde iki boyutlu manipülasyon imkanı sağlayan bir elektromanyetik aktüatör tabanlı manyetik mikromanipülâtör tasarımı ve uygulaması üzerine yapılmıştır. Elektromıknatis tasarımında, uygulanan kontrol akımı ve elektromıknatis konfigürasyonu manyetik kuvvet ve tork değerlerini belirlemektedir ve bundan dolayı en uygun, kuvvetli ve hassas bir tasarım için uygun nüve yapılarıyla beraber geribeslemeli kontrol mekanizmasının geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Manyetik aktüatörlerin, 8 µm çaplı süperparamanyetik parçacık üzerinde yaklaşık olarak 1 ila 25 pN kuvvet üretmesi amaçlanmıştır. Bunun için 6 mm boyundaki koni şekilli uca sahip nikel-demir alaşımlı nüve ve 2000 bakır sarımından yapılmış dört elektromıknatıstan oluşan bir konfigürasyon elde edildi. Manyetik mikromanipülâtör, ilk prensipler yoluyla modellendi ve modeldeki lineer olmayan terimleri doğrusallaştıran uygun bir geribeslemeli kontrol tasarımı ile kontrol edildi. Tasarlanan kontrolörün sistemin kapalı çevrimli dinamiğini kararlı hale getirdiği, hızlı geçici rejim yanıtı verdiği ve sıfır kararlı durum hatası verdiği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Tasarlanan elektromanyetik mikromanipülâtör özellikle biyolojik ayırıştırma, tıp ve biyosensör geliştirilmesi gibi alanlarda kullanılabilir geniş bir kuvvet aralığında çalışabilme kapasitesine sahiptir.

Anahtar Kelimeler – Mikromanipülâtör, manyetik kuvvet, akım kontrolü, kontrol, modelleme

A Magnetic Micromanipulator and its Control

Abstract – A magnetic micromanipulator can be developed with the ability to produce the magnetic force required for different applications, and can manipulate micron-sized particles. This study was carried out on the design and application of an electromagnetic actuator based magnetic micromanipulator which consists of feedback control structures for effective and automatic micro-particle manipulation, and provides two-dimensional manipulation on the horizontal axis. In the design of the electromagnet, the applied control current and the magnet configuration determine the magnetic force and torque values, and therefore there is a need to develop the feedback control mechanism with the appropriate core structures for an optimal, strong and precise design. The magnetic actuators are intended to produce approximately 1 to 25 pN of force on the 8 µm diameter superparamagnetic particle. For this purpose, a configuration consisting of nickel-iron alloy core having 6 mm long cone shaped tip and four electromagnet made from 2000 copper coil has been obtained. The magnetic micromanipulator is modeled by the first principles and is controlled by a suitable feedback control design which linearizes non-linear terms in the model. It is shown by experimental studies that the designed controller stabilizes the closed-loop dynamics of the system, gives a fast transient response and a zero steady-state error. The designed electromagnetic micromanipulator has the capacity to operate in a wide range of fields, especially in biological separation, medicine and biosensor development.

Keywords – Micromanipulator, magnetic force, current control, control, modeling

I. GİRİŞ

Moleküler ölçekli kuvvetin üretilmesi hücre ayırıştırması ve DNA ayrımı gibi biyolojik prosesler için önemli bir role sahiptir [1]. Bu konuyla son yıllarda geliştirilen ve üzerinde çalışılan teknikler optik tutucu [2], atomik kuvvet mikroskopisi [3], dielektroforez tabanlı tutucu [4], [5], akış kaynaklı germe [6], biyo-zar kuvvet probu [7] ve manyetik tutucu [8], [9] gibi yaklaşımları içerir. Tek bir mikro-parçacığı (hücre veya molekül gibi) nanometreden milimetre uzunluklarına kadar olan mesafelere yönlendirmek için mevcut yöntemlerle 10^{-14} – 10^{-8} N aralığında nispeten düşük miktarda kuvvet üretilmelidir [3]. Tek mikro-parçacık manipülasyonu, proteinlerle ilgili ayırıştırma ve karakterizasyon [10], nükleik asit manipülasyonu [11] ve

antikor bağlanma karakterizasyonu [12] gibi uygulamalar için yapılmıştır.

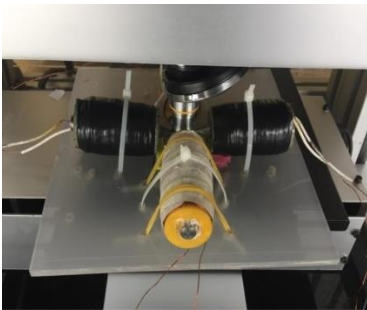
Biyolojik çalışma ortamlarında herhangi bir zararlı etkisi olmayan manyetik mikromanipülâtörler, çeşitli uygulamalar için kontrollü kuvvet üretmek amacıyla kalıcı mıknatıslardan veya elektromıknatıslardan üretilebilirler [13]–[15]. Kalıcı mıknatıslar deneysel kalibrasyon çalışmalarına dayanan basit tasarımlar sunarken, elektromanyetikler kontrollü manyetik kuvvet üretimiyle farklı tasarım seçenekleri ve uygulama imkanı sunar. Genel olarak, manyetik mikromanipülâtörler dikey veya yatay şekillerde tasarlanabilir. Dikey manyetik mikromanipülâtörlerde, manyetik kuvvet genellikle mıknatısın numuneye yaklaştırılıp uzaklaştırılması ayarlanır. Dikey tasarımın literatürdeki bazı uygulamaları, bir ucu yüzeye sabitlenmiş ve diğer ucu manyetik mikroparçacığa

yapıştırılmış DNA molekülünün esneklik vb ölçümünü rapor etmektedir [6], [16]–[18]. Dikey tasarımları kullanmak karmaşık kalibrasyon teknikleri gerektirir. Kalibrasyon gerekliliğini ortadan kaldırmak için yatay manyetik mikromanipülâtörler önerilmiştir [8], [19]–[21]. Bununla birlikte, literatürdeki tasarımlar kalıcı mıknatıslarla yapılmış ve bu mıknatısların hareketi elektrik motorları tarafından manuel olarak kontrol edilmiştir.

Bu çalışmada, geribesleme ile kontrol edilen elektromıknatıslar kullanılarak tam otomatik bir yatay manyetik mikromanipülâtör çalışması sunulmaktadır. Tasarımın dinamik modeli ilk prensiplerden çıkarıldı ve bir otomatik kontrol yöntemi önerildi. Elde edilen tasarım ve kontrolörün etkinliğini göstermek için deneysel uygulama sonuçları sağlandı.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çok çeşitli kuvvet üretme kabiliyetine sahip manyetik mikromanipülâtörler, çeşitli uygulamalar ve ölçümler için mikron boyutlu parçacıkları manipüle edebilir. Bu manyetik parçacıklar, hedef biyomoleküllere spesifik olarak bağlanmak için reseptörler ile kaplanabilir. Bu çalışmada tasarlanan manyetik mikromanipülâtör sistemi Şekil-2’de verilen deneysel kurulum yapıldı. Deneysel kurulum, elektromıknatıslar, biyoçip, kamera ve lens sistemi, bilgisayar, dc güç kaynakları, mikrokontrolör ve güç devresi ve Kartezyen robot sisteminden oluşmaktadır. İhtiyaç duyulan programların çoğu Matlab yazılımı kullanılarak yapıldı. Çalışma bölgesi (biyoçip) pleksiglas olarak bilinen Polimetil metakrilat (PMMA) malzemedan yapıldı ve akışkan haznesi olarak kullanılmaktadır. Kartezyen robot sistemi (veya kartezyen manipülâtör), xyz yönlerinde çalışabilen ve step motorlarla kontrol edilen bir manipülâtör olup, kamera sisteminin konumunu ayarlamak için kullanılmaktadır. Bu manuel kontrollü kartezyen robot sayesinde birkaç mikrometre civarında olan ince motor çözünürlüğü ile farklı boyutlardaki mikro-parçacıklara odaklanabilmekteyiz. Veri toplama ve işleme için, yüksek performanslı CPU ve Matlab yazılımı ile donatılmış bir bilgisayar terminali kullanıldı. Parçacığı tespit etme ve izleme için Matlab-temelli bir görüntü işleme programı geliştirildi. Elektromıknatısları çalıştırmak ve kontrol etmek için, mikrokontrolör ve MOSFET kontrollü akım kaynakları tasarlandı ve kullanıldı.



Şekil 1 Manyetik mikromanipülâtörün deneysel kurulumu

Genel olarak, hassas ve hızlı kontrol aksiyonları için geribeslemeli bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulur. Analiz, kalibrasyon ve kontrol tasarım amaçları için, ilk prensip yaklaşımı sistem modelini elde etmek için kullanıldı. Bu sistem modeli aynı zamanda kuvvet ve akım ihtiyaçlarını hesaplamak ve kontrol parametrelerini tahmin etmek için de

kullanılacaktır. Bütün elektromıknatısların aynı olduğu ve x ile y eksenlerine simetrik olarak yerleştirildiği varsayılarak, model ve kontrol çıkarımları sadece x-ekseni için verilecektir. Newton’un ikinci hareket yasasını ve mikroparçacığın x- ve y-doğrultusundaki bağımsız hareketini düşünerek, sıvı ortamdaki manyetik parçacık dinamiği, aşağıdaki eşitlik ile verilir

$$m\ddot{x} + \sigma\dot{x} = F_m + F_t \quad (1)$$

Burada, m (kg) parçacığın kütlesini, σ (Ns/m) sıvı çözümlerde parçacığın sürüklenme katsayısını, F_m ve F_t (N) sırasıyla manyetik kuvveti ve termal kuvveti ifade etmektedir. Parçacık üzerindeki sıvı moleküllerin etkileri sebebiyle F_t (N) rasgele termal kuvveti ifade eder (aynı zamanda *Brownian kuvveti* olarak da bilinir). Termal kuvvet güç spektrum yoğunluğu $PSD(F_t) = 4k_B T \sigma$ olan beyaz gürültü ile tarif edilir, burada $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K) Boltzmann sabitidir, T (K) ise mutlak sıcaklıktır [22]. Rasgele özellikli termal kuvvet takip edildiği gibi modellenilebilir [23]

$$F_t = \delta(2\sigma k_B T / T_s)^{1/2} \quad (2)$$

Burada, δ sıfır ortalama ve birim varyansı ile beyaz gürültüdür ve T_s örnekleme zamanıdır. Tek taraflı PSD’ler düşünülür yani parçacık sadece termal kuvvet tarafından uyarıldığında sıvı (örneğin su) içinde serbest difüzyona uğrayacaktır ($F_m = 0$).

Manyetik kuvveti hesaplamak için, manyetik alan vektörünün bileşenleri bilinmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, bazı varsayımlar kullanarak, yani nokta manyetik yük yaklaşımı ve manyetik devre yaklaşımı kullanarak manyetik kuvvete ilişkin model basitleştirilebilir. Manyetik kuvvetin akımla ilişkisi, çalışma bölgesinin merkezi ($x = 0$)’da, takip edildiği gibi elde edilir [24]

$$F_m = k_{ii} (I_1^2 - I_3^2) \quad , \quad k_{ii} = \left(\frac{k_Q k_m^2}{d^5} \right) \left(\frac{2N_c}{\mu_0 R_a} \right)^2 \quad (3)$$

burada N_c bobinlerin sarmal sayısını, R_a hava boşluğunun manyetik direncini, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Tm/A) olarak verilen havanın geçirgenliğini, $k_m = \mu_0/4\pi$ olarak verilen sabiteyi, $k_Q = 3V_b(\mu - \mu_0)/(2\mu_0(\mu + 2\mu_0))$ ile verilen mikro-parçacık ile ilgili bir fonksiyon ve d (m) çalışma bölgesinin yarıçapıdır. Sistemin kontrol akımları x-eksenindeki elektromıknatıslar için I_1 ve I_3 olarak ve y-ekseni için de I_2 ve I_4 olarak tanımlanmıştır. Denklem (3) ile verilen eşitlik, çalışma bölgesi etrafında yatay manyetik mikromanipülâtörün ürettiği manyetik alanın kontrol akımları ile olan ilişkisini sunmaktadır.

Bazı diğer kuvvetler de, kaldırma kuvveti, parçacık-parçacık etkileşim kuvveti, manyetik etkileşim kuvveti, van der Waals çekim kuvveti, termoforetik kuvveti ve parçacıklar arasındaki elektrostatik etkileşim kuvveti de dahil olmak üzere mikro-parçacık üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Uygulamaya bağlı olarak, bu kuvvetlerin bir kısmı kuvvet denge denkleminde eklenebilir. Diğer taraftan, parçacık büyüklüğüne, çalışma ortamına ve manyetik kuvvet seviyesine bağlı olarak bu kuvvetlerin çoğunu ihmal etmek mümkündür. Elektromıknatıslar nispeten yüksek bir

manyetik alan ürettiklerinden, manyetik kuvvet ve termal sürüklenme kuvveti en baskın kuvvetlerdir ve bu nedenle tüm diğer kuvvetler sistem tasarımı ve analizinde ihmal edilebilir. Özellikle, manyetik kuvvet istenen kontrol eylemlerini karşılamak için yeterli bir şekilde üretilmelidir.

Bir diğer modellenmesi gereken kısım da elektromıknatıslardır. Elektromıknatıslar bir RL devresi ile modellenirse ve Kirchhoff'un gerilim yasası uygulanırsa aşağıdaki model elde edilir,

$$L \frac{di_i}{dt} + Ri_i = V_i \Rightarrow \frac{I_i(s)}{V_i(s)} = \frac{K_e}{\tau_e s + 1} \quad (4)$$

burada sistemin model parametreleri eşit alındı ve indüktans değeri L (Henry), bobinin direnci R (Ohm) ve uygulanan gerilim değeri de V_i (Volt) olarak tanımlandı. Burada not edilmesi gereken önemli bir nokta, elektrik modelinin hızlı, kararlı ve lineer olduğu ve zaman sabitesinin de $\tau_e = L/R \approx 5 \times 10^{-3}$ s, olduğudur. Bu nedenle, elektrik model, parçacık dinamiğinden çok daha hızlı olduğu için sistem analizi ve kontrolünde elektrik modelin etkisi ihmal edilebilir.

A. Model Analizi

Mikromanipülator sistemindeki elektromıknatıslar aynı parametre değerleriyle eşdeğer olarak tasarlandı ve süperparamenyetik mikroparçacığı x- ve y-yönünde her iki yönde çekebilmesi için simetrik olarak yerleştirildi. Çalışma alanının merkezine elektromıknatıs nüve ucundan d mm mesafede olduğu düşünülürse, mikroparçacığın pozisyonu x-yönünde $x \in [-d, d]$ ve y-yönünde $y \in [-d, d]$ olarak tanımlandı. Model (1)'deki parametreler göz önüne alındığında, parçacığın kütlesinin yaklaşık olarak $m \sim 10^{-15}$ kg ve sürtünme katsayısının da $\sigma \sim 10^{-7}$ Ns/m olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla, basit bir karşılaştırma ile atalet terimi ile ilgili kuvvet $m\ddot{x}$, aslında sürtünmeden kaynaklanan kuvvet $\sigma\dot{x}$ karşısında oldukça küçük bir değere sahip olmaktadır. Yani, atalet kuvveti, analizleri kolaylaştırmak için ihmal edilebilir. Bu durumda, manyetik mikroparçacığın modeli biraz daha basitleştirilerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sigma\dot{x} = F_x + F_t \quad (5)$$

burada manyetik kuvvet dışındaki diğer kuvvetler F_t (N cinsinde) olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla, sistemin tip-1 sistem veya integral sistem olduğu görülür, yani açık çevrimli sistem verilen herhangi bir çalışma noktasına yerleşmeyecektir. İntegral sistemleri kontrol etmek genellikle sorunlu olmakla birlikte, kontrolün amacı uygun bir giriş değeri bularak sistem çıkışını zorlayarak belli bir referans değerine eşleştirmek olduğundan muhtemelen oransal bir kontrol türü istenilen sonucu verebilir.

Sistemin dinamik davranışını etkileyen bir diğer etken de elektrik model olarak da tanımladığımız denklem (4)'teki elektromıknatısların dinamiğidir. Ancak yukarıda açıklandığı gibi, elektrik model, parçacık dinamiğinden çok daha hızlı olduğu için sistem analizi ve kontrolünde elektrik modelin etkisi ihmal edilebilir.

B. Kontrolör Tasarımı

Kontrolör tasarımı için, denklem (3)'te görüldüğü gibi kontrol akımları nonlineer bir yapıya sahip olduğundan, ilk

olarak bu nonlineerliklerin etkisini ortadan kaldıracak bir kontrol yapısı düşünüldü. Uygun bir kontrol yaklaşımı olarak ofset akımı ile doğrusallaştırma yapılabilir. Bunun için ilk olarak denklem (3)'teki manyetik kuvvet ile akım arasındaki bağlantıdaki akımlar için iki adet değişken tanımlayalım, i_0 ve i_c , ve aşağıdaki eşitlikleri yazalım,

$$\begin{aligned} I_1 &= (i_0 + i_c) / 2 \\ I_3 &= (i_0 - i_c) / 2 \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (6)'i denklem (3)'te yerine yazarsak, manyetik kuvvet ifadesi aşağıdaki gibi olur

$$F_x = k_{ii} i_0 i_c \quad (7)$$

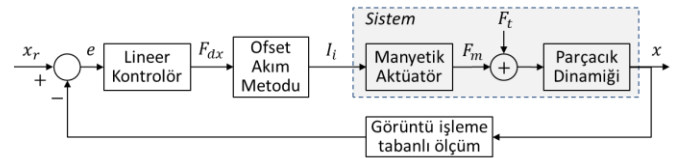
Eğer bu denklemde, i_0 değişkenin genliği sabit tutulursa ve sadece i_c değişkeni manyetik kuvvetle değişen bir fonksiyon olarak tanımlanırsa, herhangi bir kuvvet değeri gerçekleştirilebilir. Denklem (7)'den i_c değişkenini çekersek ve denklem (6)'da yerine koyarsak, elektromıknatıs akımlarını aşağıdaki gibi yazabiliriz [24],

$$\begin{aligned} I_1 &= (i_0 + F_{dx} / (k_{ii} i_0)) / 2 \\ I_3 &= (i_0 - F_{dx} / (k_{ii} i_0)) / 2 \end{aligned} \quad (8)$$

burada F_{dx} istenilen manyetik kuvvet değeridir. Dolayısıyla, ofset akımı yardımıyla kontrol akımları lineerleştirmekte ve istenilen bir manyetik kuvvet değeriyle ilişkilendirilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ofset akımının uygun seçilerek kuvvetlendiricinin doyuma ulaşmasını engellemek ve olası kararsızlıklardan kaçınmaktır. İstenilen manyetik kuvvet değeri de mikroparçacığın pozisyonuna bağlı bir fonksiyona aşağıdaki kontrolörle dönüştürülebilir,

$$F_{dx} = k_p (x_r - x) \quad (9)$$

burada k_p oransal bir kontrol kazancını, x_r referans pozisyon değerini ve x de ölçülen pozisyonu ifade etmektedir. Önerilen kontrolörün blok diyagramı Şekil 2'de görülmektedir. Aynı blok diyagram y-ekseni içinde verilebilir.



Şekil 2 Sistemi lineerleştiren bir kontrolörün blok diyagramı.

Önerilen kontrolör, sistemi doğal bir şekilde lineerleştirdiğinden, lineer analiz metotları ile kapalı-çevrimli sistemin kararlılığı incelenebilir. Denklem (8)'i denklem (5)'te yerine koyarsak, kapalı-çevrimli sistem dinamiği aşağıdaki gibi olur

$$m\ddot{x} + \sigma\dot{x} = F_{dx} + F_t \quad (10)$$

Denklem (9)'daki ifade denklem (10)'da yerine konursa ve Laplace transformu alınrsa aşağıdaki kapalı çevrimli sisteme ait transfer fonksiyonu bulunur,

$$X(s) = \frac{1}{ms^2 + \sigma s + k_p} [k_p X_r(s) + F_t(s)] \quad (12)$$

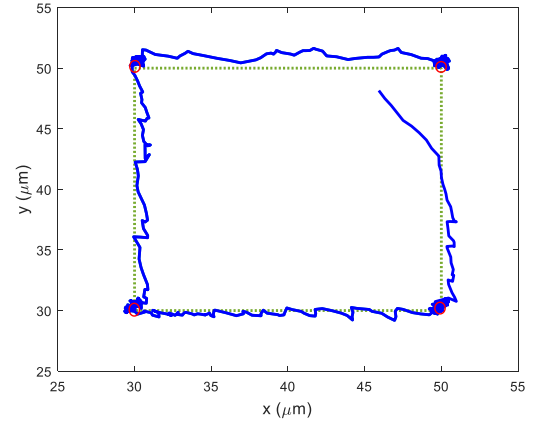
Denklem (12)'den görüldüğü gibi eğer kontrol kazancı $k_p > 0$ ise kapalı çevrimli sistem kararlı olur. Burada şunu da not etmek gerekir, bozucu olarak düşünülen F_t terimi yukarıda manyetik parçacık modellenmesinde açıklandığı ve deneysel çalışmalarla doğrulandığı gibi, rastgele özellikli termal gürültüden ibarettir ve dolayısıyla sistem kararlılığına etki etmemektedir. Ancak kontrol performansı üzerine etkisi vardır. Şunu da not etmek gerekir, basitleştirilmiş model (5) ele alındığında, kontrol kazancının hesabının doğrudan istenilen zaman sabitesi ile hesaplanabildiği görülür, yani istenilen zaman sabitesi τ_d (s cinsinde) ise kontrol kazancı $k_p = \sigma/\tau_d$ olarak hesaplanabilir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

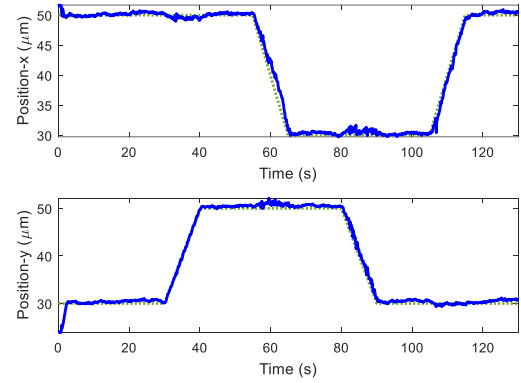
Şekil 1'de bir fotoğrafı görülen deneysel kurulum kullanılarak gerekli deneysel çalışmalar yapıldı. Geri beslemede kullanılan veriler örnekleme frekansı 640x480 piksel için 53 fps (kare hızı) olan bir endüstriyel renkli kamera ve 10X büyütme yapan bir lens kullanılarak başarılı. Elektromıknatısları kontrol edebilmek için 0-30 V ve 0-3 A çıkışları olan dc güç kaynakları kullanıldı. Atmega mikrokontrolörünün PWM çıkışları bir güç arayüz devresi ile beraber kullanılarak elektromıknatısların ihtiyaç duyduğu akım değerleri sağlandı.

Kontrol çalışmaları hem step hem de sinüzoidal referans sinyalleri için yapıldı. Model parametreleri model doğrulama çalışmaları sonucunda $k_{ii} = 2.42 \times 10^{-13}$ N/A² ve $\sigma = 2 \times 10^{-7}$ Ns/m olarak bulundu. Dolayısıyla zaman sabitesi $\tau_d = 0.25$ saniye olan bir yanıt için kontrol kazancının $k_p = 0.8 \times 10^{-6}$ N/m civarında olması gerektiği hesaplandı. Uygulanan kontrol akımlarının değeri 1 A ile sınırlandılar olarak olası manyetik doyum etkisinden kaçınıldı. Şekil 3'te step veya pals bir referans değeri için kontrol sisteminin performansı görülmektedir. Şekil 3 ve 4'te görüldüğü gibi manyetik mikroparçacık istenilen referans değerini neredeyse sıfır hatayla takip etmektedir. Kontrolör 1 saniyelik bir yerleşme zamanına sahip olup aşısız bir geçici rejim yanıtı vermektedir. Termal gürültü ve ölçüm hatalarından kaynaklanan salınımlar yaklaşık olarak $\pm 0.25 \mu\text{m}$ civarındadır. Rasgele termal gürültü kuvveti, sıvı moleküllerinin parçacık üzerindeki etkileri nedeniyle meydana gelmektedir ve etkisi sıcaklıkla artmaktadır. Deneysel çalışmalarda oda sıcaklığı 25 °C civarında ve elektromıknatısların sıcaklığı da maksimum 35-40 °C civarında tutuldu. Dolayısıyla belki bir soğutma mekanizması ile bu gürültü oranı az da olsa azaltılabilir. Bunun yanında uygun bir filtreleme ile de muhtemelen gürültünün etkisi düşürülebilir. Şekil 5'te kontrol akımlarının değişimi görülmektedir. Akımlar 0 ila 1 A aralığında değişmekte olup, kararlı-halde 0.5 A değerine yaklaşmaktadır. Bu değer ofset akımının değeridir. Mikroparçacık referans değerinden çok uzakta olduğunda, yani step değişimlerinde, maksimum akım çekilmekte ve mikroparçacığa 24 pN manyetik kuvvet uygulanmakta ve mikroparçacık yaklaşık 5 $\mu\text{m/s}$ civarında

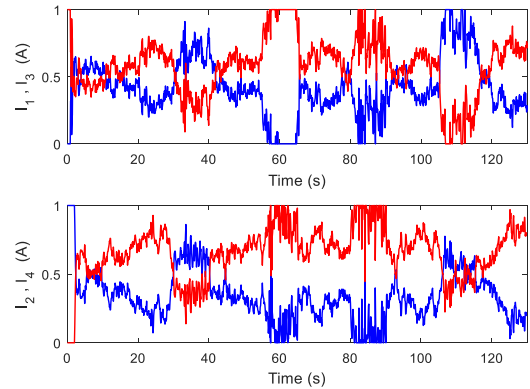
bir hızla hareket ederek referans değerine yaklaşmaktadır. Sonuç olarak, tasarlanan kontrolör oldukça yüksek bir performans, geçici rejim ve kararlı-hal yanıtı, sergilemektedir.



Şekil 3 Kontrol sisteminin x-y eksenindeki bir yörüngeyi takip yanıtı



Şekil 4 Sistemin pozisyon takip yanıtı



Şekil 5 Kontrol akımlarının değişimi

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tam otomatik bir manyetik mikromanipülator sistemi tasarlandı, modellendi ve kontrol edildi. Sistemin dinamik modeli, ilk prensiplere ilaveten manyetik kutup ve manyetik devre yaklaşımları kullanılarak geliştirilmiştir ve bu model, hassas konumlandırma için bir geribesleme doğrusallaştırıcı kontrolör geliştirmek için kullanılmıştır. Hedef süperparamanyetik parçacığın konumunu ölçmek için görüntü işleme tabanlı parçacık tespit

ve izleme algoritması geliştirilmiştir. Manyetik malzemelerin doyumuna ulaşmasını engellemek için uygulanan kontrol akımı maksimum 1 A ile sınırlandırılmıştır. Deneysel çalışmalar yapılarak, manyetik mikro-parçacık üzerinde 25 pN'a kadar kuvveti üretilebildiği ve çalışma alanının merkezinde mikro-parçacığın yaklaşık 5 µm/s'lik bir hız ile tam otomatik bir şekilde kontrol edilebildiği gösterildi. Geliştirilen sistem hücre/molekül veya mikroparçacık manipülasyonu gibi uygulamalarda kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 116E168 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Capitanio and F. S. Pavone, "Interrogating biology with force: single molecule high-resolution measurements with optical tweezers," *Biophys. J.*, vol. 105, no. 6, pp. 1293–1303, 2013.
- [2] P. Polimeno *et al.*, "Optical tweezers and their applications," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 218, pp. 131–150, 2018.
- [3] K. C. Neuman and A. Nagy, "Single-molecule force spectroscopy: optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy," *Nature Methods*, vol. 5, no. 6, pp. 491–505, 2008.
- [4] T. Kodama, T. Osaki, R. Kawano, K. Kamiya, N. Miki, and S. Takeuchi, "Round-tip dielectrophoresis-based tweezers for single micro-object manipulation," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 47, pp. 206–212, 2013.
- [5] H. Luo, W. Sun, and J. T. Yeow, "Modelling and adaptive dynamic sliding mode control of dielectrophoresis-based micromanipulation," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 40, no. 1, pp. 122–134, 2018.
- [6] S. B. Smith, L. Finzi, and C. Bustamante, "Direct mechanical measurements of the elasticity of single DNA molecules by using magnetic beads," *Science*, vol. 258, no. 5085, pp. 1122–1126, 1992.
- [7] L. Ju and C. Zhu, "Benchmarks of Biomembrane Force Probe Spring Constant Models," *Biophysical Journal*, vol. 113, no. 12, pp. 2842–2845, 2017.
- [8] R. Fabian, C. Tyson, P. L. Tuma, I. Pegg, and A. Sarkar, "A Horizontal Magnetic Tweezers and Its Use for Studying Single DNA Molecules," *Micromachines*, vol. 9, no. 4, pp. 188–200, 2018.
- [9] C. Jiang, T. A. Lionberger, D. M. Wiener, and E. Meyhofer, "Electromagnetic tweezers with independent force and torque control," *Rev Sci Instrum*, vol. 87, no. 8, p. 084304, 2016.
- [10] B. Pelz, G. Žoldák, F. Zeller, M. Zacharias, and M. Rief, "Subnanometre enzyme mechanics probed by single-molecule force spectroscopy," *Nature Communications*, vol. 7, no. 10848, pp. 1–9, 2016.
- [11] D. N. Fuller *et al.*, "A general method for manipulating DNA sequences from any organism with optical tweezers," *Nucleic Acids Res*, vol. 34, no. 2, p. e15, 2006.
- [12] M. Li *et al.*, "Atomic force microscopy study of the antigen-antibody binding force on patient cancer cells based on ROR1 fluorescence recognition," *J. Mol. Recognit.*, vol. 26, no. 9, pp. 432–438, 2013.
- [13] F. Kriegel, N. Ermann, and J. Lipfert, "Probing the mechanical properties, conformational changes, and interactions of nucleic acids with magnetic tweezers," *Journal of Structural Biology*, vol. 197, no. 1, pp. 26–36, 2017.
- [14] I. D. Vlamincik and C. Dekker, "Recent Advances in Magnetic Tweezers," *Annual Review of Biophysics*, vol. 41, no. 1, pp. 453–472, 2012.
- [15] C. Gosse and V. Croquette, "Magnetic tweezers: micromanipulation and force measurement at the molecular level," *Biophys J*, vol. 82, no. 6, pp. 3314–3329, 2002.
- [16] A. Huhle *et al.*, "Camera-based three-dimensional real-time particle tracking at kHz rates and Ångström accuracy," *Nat Commun*, vol. 6, no. 5885, pp. 1–8, 2015.
- [17] D. Klaue and R. Seidel, "Torsional stiffness of single superparamagnetic microspheres in an external magnetic field," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 2, p. 028302, 2009.
- [18] T. Strick, J.-F. Allemand, V. Croquette, and D. Bensimon, "Twisting and stretching single DNA molecules," *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 74, no. 1, pp. 115–140, 2000.
- [19] C. P. McAndrew *et al.*, "Simple horizontal magnetic tweezers for micromanipulation of single DNA molecules and DNA—protein complexes," *BioTechniques*, vol. 60, no. 1, pp. 21–27, 2016.
- [20] F. W. Schwarz *et al.*, "The helicase-like domains of Type III restriction enzymes trigger long-range diffusion along DNA," *Science*, vol. 340, no. 6130, pp. 353–356, 2013.
- [21] J. Yan, D. Skoko, and J. F. Marko, "Near-field-magnetic-tweezer manipulation of single DNA molecules," *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 70, no. 1, pp. 011905(1–5), 2004.
- [22] F. Gittes and C. F. Schmidt, "Thermal noise limitations on micromechanical experiments," *Eur Biophys J*, vol. 27, no. 1, pp. 75–81, 1998.
- [23] M. Kim and A. L. Zydney, "Effect of electrostatic, hydrodynamic, and Brownian forces on particle trajectories and sieving in normal flow filtration," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 269, no. 2, pp. 425–431, 2004.
- [24] G. Ablay, M. Büyük, and K. İçöz, "Design, modeling, and control of a horizontal magnetic micromanipulator," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2019.