

## Mikrorobot Yönlendirme Sistemleri

Özge AKBÜLBÜL<sup>1</sup>, Mert ŞENER<sup>1</sup>, Barış Oğuz GÜRSES<sup>2</sup>, Aysun BALTACI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, İzmir  
Sorumlu yazar e-posta: ozgeakbulbul@gmail.com

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, İzmir  
e-posta : mertsener45@gmail.com

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir  
e-posta : oguz.gurses@ege.edu.tr

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir  
e-posta : aysun.baltaci@ege.edu.tr

www.dergipark.org.tr/rjbb

Alınış Tarihi: 08/04/2021

Kabul Tarihi: 10/06/2021

**Anahtar Kelimeler:**

*Elektromanyetik Aktüatör,*

*Mikrorobot, Manyetik*

*Yönlendirme, Minimal İnvaziv*

*Cerrahi*

### Özet

Minimal invaziv cerrahi ile operasyonlar, geleneksel cerrahi işlemine göre daha küçük kesilerden yapılabilir. Bu durumun, hastanın ameliyat sonrası iyileşme sürecine olumlu etkileri bulunmaktadır. Cerrahi operasyonlarda, cerrahın operasyon yapacağı bölgeye ulaşmakta ve işlem yapmakta zorlandığı kısımlarda, olumlu etkiyi arttırmak için mikrorobotların kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Mikrorobotlar, doku, damar, organ gibi hassas yapılara mikro ölçekte müdahale edebilecek robotik sistemlerdir. Vücut içi uygulamalar için ilaç taşıma, örnek alma (hastalık tespiti), kesme, delme gibi işlemler konusunda kullanılabilecekleri öngörülmektedir. Mikrorobotların temassız ve bir arayüz vasıtasıyla kontrolü ile cerrahi işlemlerin standart bir hale gelmesi sağlanmasıyla cerrahi operasyonlarda komplikasyon riski azalacağı düşünülmektedir. Mikrorobotların temassız yönlendirilmesini sağlayan yönlendirme sistemleri, elektromanyetik sistemler (EMA) olarak adlandırılmıştır. Gelecekte cerrahi operasyonlarda kullanılacağı öngörülen mikrorobotların kontrolü elektromanyetik aktüatör sistemleriyle gerçekleştirilecektir. Bu sebeple, mikrorobotlar ve elektromanyetik aktüatörler hakkındaki güncel ilerlemeler araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu derleme çalışması, mikrorobotlar ile mikrorobotları yönlendirmekte kullanılan elektromanyetik aktüatör sistemleri hakkında genel bilgi vermektedir.

### Microrobot Guidance Systems

www.dergipark.org.tr/rjbb

Received: 08/04/2021

Accepted: 10/06/2021

**Keywords:** *Electromagnetic*

*Actuator, Microrobot, Magnetic*

*Navigation, Minimally Invasive*

*Surger*

### Abstract

With minimally invasive surgery, operations can be performed through smaller incisions compared to traditional surgical procedures. This situation has positive effects on the postoperative recovery process of the patient. In surgical operations, studies have begun on the use of microrobots in order to increase the positive effect in the parts where the surgeon has difficulty in reaching the area where the operation will be performed. Microrobots are robotic systems that can interfere with sensitive structures such as tissues, vessels and organs on a micro scale. It is anticipated that they can be used for operations such as drug transport, sampling (disease detection), cutting and drilling for intracorporeal applications. It is envisioned that the risk of complications in surgical operations will be reduced by ensuring that surgical procedures become standard with the control of microrobots without contact and through an interface. Guidance systems that provide contactless guidance of microrobots are called electromagnetic systems (EMA). The control of microrobots that are predicted to be used in surgical operations in the future will be performed by electromagnetic actuator systems. For this reason, current advances in microrobots and electromagnetic actuators are attracting the attention of researchers. This review provides general information about microrobots and electromagnetic actuator systems used to direct microrobots.

## 1. Giriş

Cerrahi operasyon esnasında oluşacak komplikasyonların azaltılması ve operasyon sonrasında hastanın iyileşme sürecini hızlandırmak amacıyla alternatif uygulamalar üzerine birçok araştırma yapılmaktadır [1]. Operasyonların geleneksel cerrahi yöntemlere göre daha verimli yapılabilmesi ihtimali araştırmacıları, minimal invaziv yöntemlere yöneltmiştir [2]. Bu çalışmalarda cerrahi prosedür öncesi yapılan tanısal endoskopi, laparoskopi, bronkoskopi [3] gibi bazı işlemler gerçekleştirilmektedir. Bu ön işlemler ve cerrahi operasyonlarının bütününde, hastaya uygulanan minimal kesilerin de azaltılması için mikro veya nano boyuttaki robotların bu alanda kullanılabilirliğini araştırma yoluna itmiştir. Bu motivasyonla mikro ölçekteki cisimlerin manipülasyonuna yoğunlaşmıştır. Ufak kesilerden uygulanan, hastayla cerrah arasında fiziksel bir etkileşimin olmadığı ameliyatların da hem cerrahın işini kolaylaştıracağı hem de hastanın iyileşme sürecini hızlandıracağı öngörülmektedir [4][5]. Teknolojinin gelişmesi ile temassız ve uzaktan gerçekleştirilebilen ameliyatlara zemin oluşacak ve uzman cerrahların bulunmadığı yerlerde bile uzaktan yönlendirilebilen sistemlerle başarılı operasyonlar gerçekleştirilebilecektir [6][7]. Ufak kesiler söz konusu olunca mikro boyuttaki cerrahi ekipmanlar akla gelmektedir. Bu hususta mikrorobotlar; ilaç dağıtımı, hücre manipülasyonu, mikro montaj ve biyoalgılama gibi işlemler amacıyla minimal invaziv işlemler için uygun robotik sistemlerdir[8]. Mikrorobotlar, boyutları nedeniyle vücut içinde minimal invaziv muayene ve ameliyatlara yapma imkanı sağlar ve doku travmasının azalması nedeniyle bu işlemlerden kaynaklanan komplikasyonları azaltma potansiyeli oluşturmaktadır [9]. Minimal invaziv işlemlerin vücut içerisinde temassız ve hatta uzaktan gerçekleştirilebilmesi için gerekli kuvvet; akışkan, elektriksel, optik, akustik ya da manyetik etkilerle oluşturulabilmektedir [10]. Mikromanipülatör, bir cisim ile fiziksel olarak etkileşime girmek için kullanılan, insan eliyle elde edilemeyen bir hareket hassasiyetinin gerekli olduğu bir cihazdır [11]. Bu mikromanipülatörler yardımıyla hareket ettirilen mikrorobotlar cerrahi uygulamalarda farklı fonksiyonları yerine getirmektedir [12]. Manyetik özelliğe sahip vücut içine girecek bu mikrorobotların manipülasyonu ise "*Elektromanyetik Aktüatör (EMA)*" adı verilen sistemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu derlemenin amacı mikrorobotlar hakkında bilgi vermek ve mikrorobotların navigasyonuna yönelik elektromanyetik sistemlerle alakalı çalışmalara değinmektir.

## 2. Mikrorobot

Mikrorobotik, milimetre ve milimetre-altı nesnelere kontrollü bir şekilde fiziksel olarak etkileşime girebilen sistemleri inceleyen bir disiplindir [13]. Mikrorobotlar özellikle canlı organizmalardan ve doğadan esinlenilerek tasarlanmış ve özellikle canlı vücudu içerisinde ulaşamayacak yerlere müdahale edebilmek için üretilen robotik sistemlerdir [14]. Mikrorobotların, elektriksel, optiksel, akustik ve manyetik kuvvetler etkisiyle tahriği sağlanmaktadır. Mikrorobotlar, gövdesine yerleştirilen pil, batarya gibi güç kaynaklarından beslenerek ya da dışarıdan

verilen kuvvet etkisiyle hareket ettirilmektedir [15]. Mikrorobotların ufak kesilerden vücut içerisine gönderilmesi hipotezi düşünüldüğünde direkt olarak bağlantı elemanı olmayan, mikrorobotun üzerinde kuvvet üretecek bir manipülasyon kaynağı tercih edilmesi gerekmektedir. Bu hususta, mikrorobotu harici kuvvetlerle manyetik olarak yönlendirmek diğer yöntemlere göre daha verimli görünmektedir.

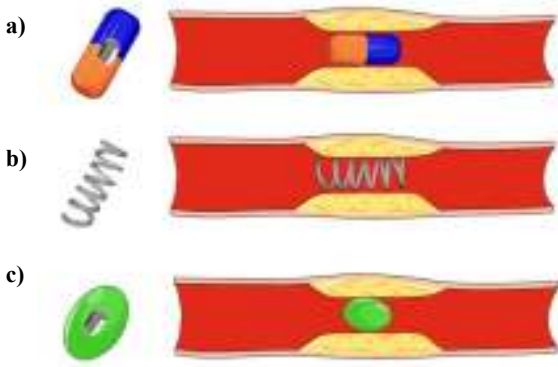
### 2.1. Medikal Mikrorobotların Kullanım Alanları

Mikrorobotlar işlevsel olarak, hastalık teşhisinde aktif görüntüleme, sağlık durumu izleme için mobil yerinde algılama, hedefli terapi[16], minimal invaziv cerrahi, doku mühendisliği [17], hücre manipülasyonu [18] kategorileri altında toplanmıştır [19]. Mikrorobotların insan vücudu içerisindeki uygulama amaçlı kullanımı, genellikle kardiyovasküler, endovasküler sistemlerde tıkanıklık (oklüzyon) açma, ilaç taşıma, kök hücre ve doku taşıma, parça koparma işlemleri şeklinde kurgulanmıştır [20]. Mikrorobotların medikal alanda kullanımı, mikrorobot manipülasyonu, malzemesi, üretim yöntemleri, güvenlik durumu gibi birçok alt disiplinde araştırma konularına ayrılmaktadır. Bu derleme çalışmasında mikrorobotların temassız uzaktan kontrolü için elektromanyetik aktüatör sistemleri ele alınmış, mikrorobot çeşitleri direkt olarak manyetik özellikli malzemeden üretilen (biyolojik yapıda olmayan) ve biyolojik bir yapının manyetik özellik kazandırılarak mikrorobot haline getirilerek üretilen mikrorobot şeklinde sınıflandırılmıştır. Tablo 1 kapsamında literatürden örneklerle biyolojik yapıda olan/olmayan mikrorobotların uygulama alanları, üretim şekilleri ve hareket mekanizmaları hakkında genel bilgiler verilmiştir.

### 2.2. Biyolojik Yapıda Olmayan Manyetik Mikrorobotlar

Biyolojik yapıda olmayan mikrorobotlar ve nanorobotlar, polimer bir gövde içerisine manyetik özellik içeren kısmın yerleştirilmesiyle elde edilir veya direkt olarak manyetik olan kısma şekil verilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Şekil 1'de manyetik özellikli mikrorobotlar gösterilmektedir. Biyolojik olmayan yapıdaki mikrorobotların manyetik kısımları, mikrorobotu yönlendirmenin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Manyetik özelliğe sahip malzemelerden yapılmaktadırlar. Manyetik mikrorobotlar da gövde kısmı sert veya yumuşak manyetik malzemelerden yapılabilir. En yaygın mikrorobotik manyetik malzemeler sert Neodyum-Demir-Bor (NdFeB) mikropartikülleri, süperparamanyetik demir oksit nanopartiküller (SPION'lar), Krom Oksit tozu (CrO<sub>2</sub>), Demir-Platin (FePt) nanopartiküller ve diğer sert veya yumuşak manyetik mikro/nano ölçekli moleküllerdir. Robot gövdesinin içine gömülü veya yüzeyinde yer alan diskler veya tellerdir. Ayrıca nikel, kobalt ve diğer manyetik malzemeler de nanofilm kaplama olarak robotun dış yüzeyine püskürtülebilir [31]. Kullanılan amaca göre manyetik kısmın bulunduğu gövde ise mikro-elektromekanik sistem (MEMS) mikrofabrikasyon yöntemleri [32], katmanlı üretim teknikleri [33], litografi, püskürtme, fotorezist adlı ışığa duyarlı

malzemenin kullanımıyla fotolitografi [34] gibi yöntemlerle elde edilmektedir. Boyutları biyolojik yapıdaki mikrorobotlara göre daha büyük olan biyolojik olmayan yapıdaki mikrorobotlar görüntülenme ve yönlendirme işleminin kolay yapılabilmesi açısından ilk olarak göz organı için düşünülmüştür. Oftalmoskopik operasyonlar için mikrorobotlar, pars plana bölgesinde diyabetik retinoterapi, retina ve vitreus kısmında vitrektomi operasyonlarında kullanılmak üzere mikrorobot ve mikrorobotu yönlendirecek sistemi tasarlamışlardır [35]. Göz harici diğer biyomedikal uygulamalarda birçok bölge için mikrorobotların kullanımı düşünülmüştür. Gastrointestinal bölgede kapsül mikrorobot kullanımı [36], kardiyovasküler sistemde ve beyin bölgesinde tıkanıklık açma ile ilaç taşıma, ürolojik bölgede [37] ve üreme sisteminde tedavi, döllenme kullanım amacına yönelik suni gövdeli manyetik parça içeren ya da direkt olarak manyetik malzemeden üretilmiş mikrorobotlar tasarlanmıştır. Hangi bölgede kullanıldığına yönelik, mikrorobotları yönlendirecek elektromanyetik aktüatör sistemleri geliştirilmiştir. Fakat göz harici bahsedilen diğer bu biyolojik sistemlerde görüntülenmenin direkt gerçekleştirilemiyor oluşu, elektromanyetik sistemlerdeki geri beslemeyi ve dolayısıyla kontrolü etkilediğinden bu durum araştırmacılar tarafından ayrıca inceleme konusu olmuştur.



Şekil 1. a) Kapsül şeklindeki biyolojik olmayan mikrorobot b) Spiral şeklindeki biyolojik olmayan mikrorobot c) Elipsoid şeklindeki biyolojik olmayan mikrorobot

### 2.3. Biyolojik Yapıdaki Manyetik Mikrorobotlar

Biyolojik yapıdaki mikrorobotlar, manyetik özellikli malzeme ile lipid, protein, aminoasit gibi hücre yapıtaşlarının birleştirilmesiyle ya da hücre içerisinde bulunan ve manyetik madde içeren yapıların manipülasyonu ile manipüle edilebilmektedir. Şekil 2’de bahsi geçen biyolojik yapıların manyetik özellikli mikrorobot haline getirilmesi işlemi gösterilmiştir. Hastalıklı, kanserli hücelere yönlendirilen biyolojik yapılı mikrorobotların üzerine konumlandırılan düşük dozlardaki ilaçlar ile hastalıklı dokular etrafına manyetik olarak ulaştırılması sağlanarak, hedeflenmiş ilaç taşınımı işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu sayede özellikle yan etkileri bulunan ilaçların vücut içerisinde her yerde dolaşması önlenmiş, sadece hedef bölge yeteri kadar etkilenmiş olmaktadır. Bu tarz ilaç taşınımı harici kök hücre tedavilerinde de sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [24]. Hedef hastalığa yönelik geliştirilen kök hücrelerin hedef bölgeye taşınma işlemi mikrorobotlar yardımıyla sağlanmaktadır [38]. Makrofağ şeklinde [39], helisel şeklinde, kirpiksi şeklinde [40], flagella şeklinde [41], bakteri tabanlı

bakteriyobot şeklinde [42] manyetik özellikli biyolojik yapıları mimik eden ve dışarıdan manipülasyonu sağlanabilen mikrorobotlar üretilmiştir.  $Fe_3O_4$  manyetik nanopartikülleri ile hipertermi tedavisinde kullanılabilen mikrorobotlar üretilmektedir [43]. Hipertermi tedavisi için 3 boyutlu bozunabilen hipertermi mikrorobotu da üretilmiştir [14].


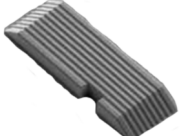



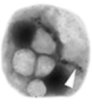


### 3. Elektromanyetik Sistemler

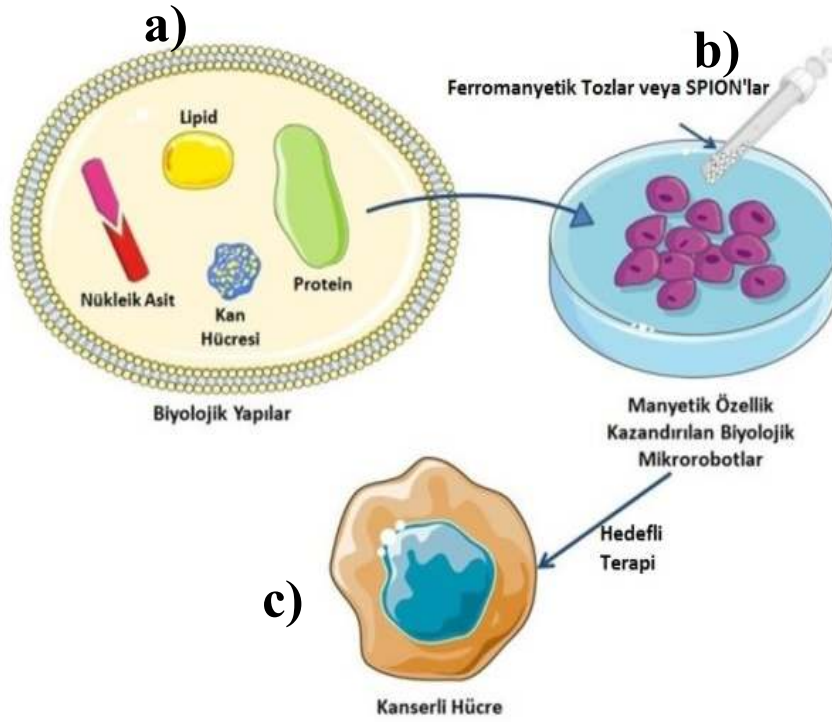
Manyetik bir nesne manyetik bir alana yerleştirildiğinde, manyetik bir kuvvete ve/veya torka maruz bırakılır. Manyetik mikromanipülasyon; gradyan bazlı ya da tork bazlı mikromanipülasyon olarak kategorize edilebilir [13]. Gradyan bazlı mikromanipülasyonda mikrorobotu hizalama hareket ettirme işlemi gerçekleştirilirken, tork bazlı mikromanipülasyon işleminde nesneyi istenilen yöne ve açı derecesine döndürme işlemi mikrorobota temassız şekilde gerçekleştirilir.

Elektromanyetik Aktüatörler (EMA), işlem yapılacak bölgeye göre oluşturulan bir çalışma uzayından (workspace), elektromanyetik sargılardan, kontrolcü ve görüntü geribesleme sisteminden oluşmaktadır. Sargı sarım sayısı ve sargı boyutu, manipüle edilecek cisme ve çalışma alanının büyüklüğüne göre değişmektedir [20]. EMA sistemini oluşturan alt bileşenler Şekil 3’de belirtilmiştir. Elektromanyetik aktüatörde, manyetik alan sabit mıknatıslar ya da elektromıknatıslar ile gerçekleştirilebilmektedir. Sabit mıknatıslar ile çok daha büyük manyetik alan değerlerine erişilebilmesinin yanında kontrol edilebilmesi açısından sorun yaratabilmektedir. Bunun yerine elektronik olarak akım değerinin değiştirilmesiyle manyetik alanın değiştirildiği yani kontrolcü içeren EMA sistemleri kullanılmaktadır.

Bu sistemde cerrah, biyopsi ya da tedavi amaçlı bir mikrorobot temassız olarak hareket ettirmek istediğinde, girilen komuta karşılık kontrolcüde ayarlanan akım değerlerine göre sargı sistemi uyarılarak bir manyetik alan oluşturulur. Çalışma uzayındaki mikrorobot üzerine etkiyen kuvvet ve tork ile istenilen rota ve hızda hareket sağlanmış olur. Mikrorobot üzerinde manyetik kuvvet ve tork oluşturma, en basit yöntemiyle Helmholtz ve Maxwell bobinleriyle gerçekleştirilir.

Tablo 1. Literatürden mikrorobotların çeşitli uygulama alanları

Mikrorobot	Uygulama Alanı	Üretim Şekli	Hareket Mekanizması
<b>Spiral Tipi Mikrorobot</b>  [21],[22],[23]	Hedefli terapi ya da ilaç taşıma amaçlı insan vücudunda parçacıkları sınırlı bir hacimde tutmak ve tirbuşon hareketi ile taşımak maksadıyla kullanılmaktadır.	Sıvı fazlı PDMS ile silindirik bir şablonun daldırma ile kaplanması, yerinde ısıtma ile şablonun kaldırılması, mikrografi ile incelenerek mikrotüpün soyulması, yerinde ısıtma ile PDMS kaplı şablonun kaldırılması gibi detaylı bir prosesi kapsamaktadır.	Manyetik bir manipülatör tarafından kablosuz olarak kontrol edilmektedir. Bir parçacığı sınırlı bir hacim içinde tutmak için "al ve bırak" (Pick&Drop) hareketi sergilemekte ve onu bir tirbuşon hareketiyle taşımaktadır.
<b>Nöral Hücre İletim Mikrorobutu</b>  [24]	Sinir kümelerini aktif olarak bağlayarak nöronların sinir ağında nasıl iletişimi kurduğunu anlamak için, iki sinir kümesi arasındaki bir boşluğa hassas teslimat yoluyla sinir ağlarını bağlamak amacıyla nöron yüklü bir mikrorobot tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir.	Mikrorobotların genel üretim süreci gerçekleştirilmiştir. İki fotonlu lazer litografi ve nikel kullanılmıştır. Manyetik özellikler için Ni, biyoyoumluluk için TiO <sub>2</sub> tercih edilmiştir.	Sekiz adet elektromanyetik bobinin oluşturduğu bir kombinasyonun ürettiği harici bir manyetik alan tarafından manipülasyon gerçekleştirilmektedir.
<b>Göz içi Mikrorobot</b>  [25]	Gözün arka kısmında kalan pars plana bölgesindeki operasyonlarda tedavi için gerekli ilaç hacmini azaltmak amaçlı tasarlanmış operasyonel mikrorobottur.	Litografi ile içi boş silindir şeklinde üretilen mikrorobot, polipirrol veya inert metalik kaplamalar kullanılarak toksik olmayan hale getirilmektedir.	Göz içi mikrorobot, kablosuz olarak kontrol edilir ve manyetik bir aletle çıkarılmaktadır. OctoMag adı verilen sekiz adet eş elektromanyetik bobinin ürettiği manyetik alan gradyanların hareketiyle sağlanmaktadır.
<b>Kalp için mikrorobot</b>  [26]	Koroner arterlerde kullanılan geleneksel bir kılavuz telin yönlendirilebilirliğini artıran yeni, manyetik olarak çalıştırılan, kılavuz telin ucuna eklenebilecek yumuşak bir mikrorobot tasarlanmıştır.	PDMS(polidimetilsiloksan) silikondan üretilmiş bir kiriş, neodyum mıknatıs, bir mikro yay ve bir kılavuz telden oluşan elastomerik katkılı polidimetilsiloksan (PDMS) metal ana kalıbı ve PDMS kullanılarak replika kalıplama ile yapılmıştır.	Harici manyetik alan üretebilen sekiz adet eş elektromanyetik bobin içeren OctoMag sistemi ile mıknatıslı yumuşak mikrorobotun, 3 boyutlu olarak hizalandırılması ve yönlendirilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir.
<b>Yuvarlanan Mikrorobot</b>  [27]	Çeşitli minimal invaziv in vivo biyomedikal uygulamalar mikrorobot sisteminin geliştirilmesi amaçlı çalışma gerçekleştirilmiştir.	Mikrorobotun sert katkılı SU-8 fotorezistten yapılmış olanlar ve standart fotolitografi teknikleri kullanılarak elastomerik katkılı polidimetilsiloksan (PDMS) fotorezistten yapılmış iki farklı varyantı üretilmiştir.	Kablosuz kontrol ve tahrik için zamanla değişen harici manyetik alanın kaynağı olarak iki serbestlik dereceli dönen kalıcı mıknatıs sistemi kullanılmıştır.
<b>Manyetotaktik Mikrorobot</b>  [28]	Bakteriyel mikrorobotları, Staphylococcus aureus patojenini öldürmek amaçlı hedeflemek ve ona bağlanmak için yönlendirilmiştir.	Manyetotaktik bakteriler, manyetozom adı verilen hücre içi manyetik kristalleri nedeniyle manyetik alan çizgileri boyunca yüzen benzersiz bir bakteri grubudur. Bu bakterilerin bazıları ototroftiktir ve kendi kendilerine enerji sağlayabilirler ve hareketli hızları 300 µm/s'ye ulaşmaktadır.	Harici manyetik alan üreten elektromanyetik aktüatör sistemi sayesinde, mikrorobot ve Staphylococcus aureus patojeni bağlanması için dönen bir manyetik alan altında karşı karşıya getirilmiştir. Osilasyon yapan bir manyetik alan altında ise patojen öldürülmüştür.
<b>Protein Bazlı Mikrorobot</b>  [29]	Protein motorlarının Hava-su ara yüzünde mikrorobotların modüler olarak çalıştırılması, çevresel iyileştirme için su kirleticilerinin giderilmesi ve motorun kendi kendini imha etme yoluyla hedeflenen kargo teslimi gibi farklı işlevleri gösterilmek istenmiştir.	Süperparamanyetik demir oksit nanopartikülleri (SPION'lar) protein matrisine entegre ederek manyetik proteinin doğal veya biyosentetik kaynaklardan üretimi ile nanokompozit motorlar üretilmiştir. Tahrik mekanizması, kapana kısılmış HFIP molekülleri su ile değiştirilerek β-yaprak nano yapıların oluşumuna neden olmaktadır.	Protein motorları diye adlandırılan mikrorobotlar, harici manyetik alanlar kullanarak çalıştırma, itme ve yönlendirme kontrolü ile iki boyutta aktif bir şekilde hareket ettirilmektedir.
<b>Hücre Mikrorobotları</b>  [30]	Mikrorobotların, nakledilen kök hücrelerin hassasiyetle hedeflenmesi hususunda biyoyoumlu gözenekli 3 boyutlu mikrorobotlar geliştirilmiştir. Kök hücrelerin teslimi için fizibiliteyi değerlendirilmiştir.	Mikrorobotlar 3 boyutlu mikroelektromekanik sistemler (MEMS) teknolojilerini kullanarak, fotorezist, lazer litografi, Ni-Ti püskürtme gibi işlemlerle tasarlanmıştır. Kök hücrelerin kültürü ve verilmesi için mikrorobotlar üretilmiştir.	Harici bobinlerin oluşturduğu manyetik alanlardan dönen bir manyetik alanın uygulanması üzerine yuvarlanma ve tirbuşon hareketleri sergileyen küresel ve sarmal mikrorobotlar, bir manyetik alan gradyanı tarafından çekilenlere göre daha yüksek itme verimlilikleri göstermektedir.



Şekil 2. a) Biyolojik yapıların gösterimi b) Canlı organizmalara manyetik özellik kazandırılması (ferromanyetik tozlar veya süperparamanyetik nanoparçacıklar ile) c) Biyolojik yapıdaki mikrorobotların hedefli terapi kapsamında kanserli hücre için kullanımının gösterilmesi



Şekil 3. Elektromanyetik aktüatör sistemi (elektromanyetik sargılar, kontrolcü, görüntüleme sistemi ve insan-makine arayüzü) ile mikrorobot kontrolünün gösterilmesi

serbestlik derecesi pozisyonu, 2 serbestlik derecesi oryantasyon yönü) olmak üzere 5 serbestlik dereceli olmak üzere ayarlamışlardır [33]. Önerilen çeşitli EMA sistemleri, mikrorobotların farklı hareket performans yeteneklerini göstermeye ve EMA sistemlerinin tıbbi cihaz olarak uygulanabilirliğini gösterir. Bu nedenle, bu makale yeni bir tür tıbbi EMA sisteminin geliştirilmesi veya bu tür sistemlerin uygulanması için büyük yarar sağlayabilmektedir

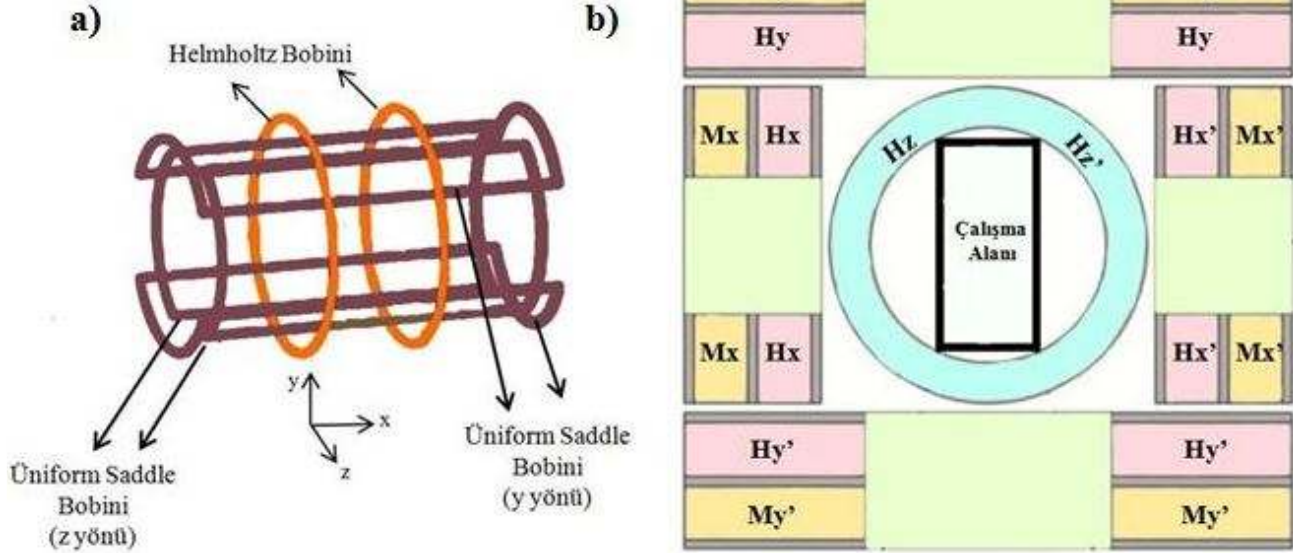
[35]. Yu ve arkadaşları ise intravasküler sistemde damar içi hareket edecek bir mikrorobot için 3 boyutlu bir elektromanyetik aktüasyon sistemi yapmışlardır ve intravasküler bir fantomda denemelerini gerçekleştirmişlerdir [44]. Kwon ve ekibi ise tasarladıkları elektromanyetik aktüatör ile insan damarlarında hareket etmesine yönelik çalışmalar yapmışlar ve mikrorobot manipülasyonunu damar fantomunda gerçekleştirmişlerdir [45]. Bu sistemlere

alternatif olarak insan kan damarında hareket edeceği düşünülerek kurgulanan üç boyutlu boru şeklindeki bir ortamda mikrorobotun hassas manipülasyonu için üç boyutlu (3B) salınımlı (osilasyonlu) bir manyetik alan üretmek için bir elektromanyetik aktüatör sistemi de önerilmiştir [46]. Ancak EMA sistemlerinde çalışma alanının bobinler tarafından kısıtlandığı, hastaya erişimin zorlaştığı ve belirli boyuttaki bir mikrorobot için manipülasyon işleminin gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Bu duruma çözüm olarak aynı EMA sisteminde belirli bir çalışma alanında, çalışma uzayına erişim, çalışma uzayının ayarlanabilmesi ve farklı boyutlardaki mikrorobotları manipüle edebilmesi için hareketli manyetik çekirdekli yeni dört kutuplu bir EMA sistemi geliştirilmiştir. Sonuçlar, çeşitli boyutlardaki mikrorobotların çalıştırılmasının belirtilen çalışma uzayında mümkün olduğunu göstermektedir. Ayrıca hareketli çekirdekli bir EMA sisteminin sabit çekirdekli sistemlere göre daha verimli bir şekilde manipüle edilebileceği gösterilmiştir [47]. EMA, açık ve kapalı olmak üzere iki döngü ile kontrol edilmektedir. Açık döngüde mikrorobot direkt manyetik bir kuvvet etkisiyle hareket ettirilirken, kapalı döngüde görüntüleme sistemiyle konum ve oryantasyon(poz) durumunun kontrolü, doğruluğu sağlanabilmektedir. Zarrouk ve arkadaşları, mikrorobotu hem açık döngü hem de kapalı döngü şemalarında manyetik bir mikrorobotu kontrol edebilen bir manyetik platform önermişlerdir. İki boyutlu çalışma alanında sabitlenmemiş bir mikrorobotun pozisyon kontrolünü yapabilen dört kalıcı mıknatıs tabanlı bir aktüatör tasarlamışlardır [48]. Nakamura ve arkadaşları, vasküler duvarla teması korurken vasküler bir ağda hareket edecek üç adet kalıcı mıknatıstan oluşan mikrorobot tasarlamışlardır ve bu mikrorobotu hareket ettirecek 4 çift bobinden oluşan 2 boyutlu EMA sistemini üretmişlerdir [49]. Bir başka EMA sistemi tarafından tahrik edilen hibrit hareketli yeni bir manyetik olarak çalıştırılan hibrit mikrorobot önerilmiştir. Bir o-ring tipi sabit mıknatıs, 3 eksenli Helmholtz bobinleri tarafından üretilen dönme manyetik alanı tarafından tahrik edilen bir aktüatör olarak hibrit mikrorobot içine yerleştirilmiştir. Bu mikrorobot iki hareket mekanizmasından oluşur. Birincisi, gövdesini döndürerek hareket ettirilen spiral jet hareketidir. Diğeri, mikrorobotun titreştirilerek yönlendirildiği fin hareketidir. Hibrit mikrorobotun içinde sadece bir kalıcı mıknatıs kullanıldığından, EMA ile ayrı kontrol edilebilmektedir [50]. Manyetik olarak çalıştırılan yumuşak manyetik robotlar yaygın damar içi pıhtılaşmanın tedavisini iyileştirebileceği öngörülerek intravasküler tedaviler sırasında kullanılan milimetre çapındaki kılavuz telleri yönlendirmek amaçlı, OctoMag EMA sistemiyle 3 boyutlu vasküler fantomda deneyler gerçekleştirilmiştir [51]. EMA sisteminde helisel kuyruklu mikrorobotların yönlendirilmesi hususunda kontrol probleminin çözülmesinde farklı yaklaşımlar da denenmiştir. EMA'da, elektromanyetik bobinlerde manyetik alan, akımın ayarlanmasıyla değiştirilir ve kurulumun kendisi sabit kalır. Alanı değiştirmek için, mıknatısın kendisinin mikrorobottan daha yakın veya daha uzağa taşınması gerekir. Bu sistemde, mıknatıs robotik bir kola takarak elde edilebilmektedir. Ayrıca, dönen manyetik alanları elde etmek için mıknatıs bir döner motora takılabilmektedir. Fazla serbestlik derecesinin eklenmesi ile helisel kuyruklu mikrorobotun kontrol probleminin çözülmesini sağlayabileceği öngörülmektedir[52]. Bunun harici biyolojik yapıdaki mikrorobotlardan makrofaj esaslı mikrorobotun harici olarak çalıştırılması için bir EMA sistemi

geliştirilmiştir. EMA sistemi, her biri x eksenine, y eksenine ve z ekseninde bir çift olmak üzere üç çift Helmholtz bobininden ve her biri x eksenine ve y ekseninde bir çift olmak üzere iki çift Maxwell bobininden oluşmaktadır. Üç çift Helmholtz bobininin rolü, bir üniform manyetik akı yaratmak iken, iki çift Maxwell bobininin amacı, ilgili bölgede üniform bir manyetik akı gradyanı oluşturmaktır. Bu sistemde aktif kanser tedavisi için makrofaj tabanlı mikrorobotun yönlendirilmesi in vitro olarak gerçekleştirilmiştir[53]. Kirpiksi mikrorobotta manyetik aktivasyon ve biyoyumluluk sağlamak için mikrorobotun kirpik kısmına bir nikel/titanyum çift katman püskürtülmüştür. Mikrorobot kirpiklerinin karşılıklı olarak harekete geçirmek için basamaklı bir manyetik alan oluşturan bir elektromanyetik bobin sistemi ile manipüle edilmiştir. Kirpiklerin vurma hareketi net bir itici kuvvet üretmiştir ve bu da mikrorobotun hareketiyle sağlamıştır [54]. Başka bir çalışmada da 3 boyutlu sarmal bir yapıya sahip bozunabilir bir hipertermi mikrorobotu (DHM-Degrable Helical Microrobot), aktif olarak kontrol edilen ilaç iletimi, salımı ve hipertermi tedavisini mümkün kılmaktadır. DHM'ler, beş serbestlik derecesi elde etmek için yarım küre biçimli bir konfigürasyonda sekiz elektromanyetik bobinli bir EMA sistemi tarafından üretilen bir RMF kullanılarak manipüle edilmektedir. Mikrorobotun tirbüşon benzeri hareket yapmasını sağlar [55]. Hoang ve arkadaşları, bir kablosuz kapsül endoskop yapısına dayanan ve gastrointestinal (GI) yoldaki hedef lezyonu hareket ettirmek, gözlemlenmek ve işaretlemek için harici bir elektromanyetik çalıştırma sistemi tarafından aktif olarak kontrol edilebilebileceği öne sürmüşlerdir. Önerdikleri EMA sistemi bir Helmholtz bobini ve iki özel tasarımı tek tip dikdörtgen bobin kapsül hizalaması için üniform bir manyetik alan (UMA) oluşturmak için kullanılmaktadır. Kapsülü itmek için UMA'yi kaplayan bir gradyan manyetik alan (GMA) oluşturmak için iki Maxwell bobini kullanılır. Bu şekilde WCE'nin geleneksel endoskopik operasyonun klinik uygulamalarının sınırlamalarını ortadan kaldırmak için, sindirim organlarındaki lezyonları, tümörleri veya polipektomi bölgelerini işaretlemek için uzaktan kontrollü (wireless capsule endoscopy) endoskopi yöntemi EMA ile gerçekleştirilebileceği kurgulanmıştır [57]. Jeong ve arkadaşları, insan kan damarlarının içinde elektromanyetik olarak gerçekleştirilen yönlendirmeye bir mikrorobot yönlendirilmiştir. İlaç verme operasyonlarının gerçekleştirdiği, hedef noktada kabarcıkların seçici akustik uyarımı ile ilaç salınımının gerçekleştirilerek hedef dokularda tedavi amaçlı yeni bir mikrorobotik ilaç dağıtım teknolojisi sunulmaktadır. Önceki çalışmalardan farklı olarak, önerilen mikrorobot sıvı ilaç formlarını sulu bir ortamda kapsülleme ve taşıma yeteneğine sahiptir. Bu teknoloji, herhangi bir karmaşık mekanik parça olmadan kablosuz olarak ilaçları manipüle etmek için sıkıştırılabilir kabarcıklar kullanır, bu da mikrorobotun tasarımının basit olmasını sağlamaktadır. Elektromanyetik bobin sistemi, üniform manyetik alanları ve manyetik akı gradyanını oluşturan iki bobin çiftinden oluşur. Elektromanyetik bobin sistemi, itme bilyalı rulmanlar (thrust ball bearings) kullanılarak, sistemin merkezi etrafında yatay ve manuel olarak döncek şekilde tasarlanmıştır. Mikrorobotun yönlendirilmesi için T tipi damar fantomu kullanmışlardır [58]. Go ve arkadaşları, sadece dört elektromanyetik bobin kullanan 3 boyutlu sıralı mikrorobotlardan oluşan (lokomotif) bir mikrorobot için yeni bir EMA önermektedir. Önerilen EMA, iki dairesel bobin ve

iki eyer bobininden oluşan çok basit bir yapıya sahiptir. Mikrorobotun hizalanması ve itilmesi, dört bobinden gradyan manyetik alan tarafından belirlenmektedir. Bir damarı fantomunun, mikrorobotun fantomda bir hedef pozisyona hareket edebildiği ve hedef lezyona bir ilaç verebileceği

gösterilmiştir [59]. Choi ve arkadaşları, tübüler bir ortam boyunca dolaşabilen ve manyetik bir navigasyon sistemi tarafından harekete geçirilen farklı hedef noktalarında ilaçları seçici olarak serbest bırakabilen yeni bir kapsül tipi manyetik mikrorobot önermişlerdir. Önerilen mikrorobot,



Şekil 4. Elektromanyetik aktüatör sistemlerinde uygulama alanlarına göre değişen bobin topolojileri a) Boru şeklindeki ortamlarda etkili bir şekilde gezinebilen üç boyutlu (3B) salımlı bir manyetik alan oluşturmak tasarlanan Bobin Topolojisi [46]. b) Tümör hücrelerini hedefleyen bir mikrorobot için iki boyutlu (2B) Bobin Topolojisi. İki çift Helmholtz bobini ve iki çift Maxwell bobini ve z ekseninde bir çift Helmholtz bobininden oluşan bir EMA sistemidir. z ekseninde Helmholtz bobini, mikrorobotun titreşimini tetikleyebilir ve böylece mikrorobot ile alt yüzey arasındaki sürtünmeyi azaltabileceği düşünülmüş eklenmiştir [56].

farklı ilaçlar içeren iki silindirik ilaç odası bulunan kapsül tipi bir yapıdır. Manyetik bir gradyan ile tübüler bir ortamda dolaşabilir ve tekdüze dönen manyetik alanlar kullanarak farklı konumlardaki ilaçları serbest bırakabilmektedir. Önerdikleri kapsül mikrorobotu, 3 boyutlu katmanlı baskı teknolojisini kullanarak prototiplemişlerdir. Mikrorobotun ilaç salma hareketinin çalışma koşulları, vücuttaki manyetik kuvvet ve momentleri araştırılarak belirlenmiştir. Bu çalışmadaki EMA bir Maxwell bobini, Helmholtz bobini, gradyan eyer bobini ve iki üniform eyer bobini ile yapılandırılan bobin sistemidir. Helmholtz bobini ve üniform eyer bobini üniform manyetik alan üretirken Maxwell bobini ve gradyan eyer bobini manyetik gradyanı oluşturur. Dört bobinli EMA, manyetik eğimli ve 2 boyutlu düzlemde düzgün manyetik alanı seçerek mikrorobotu hareket ettirebilmektedir. Üç bobinli EMA, ilacı 3 boyutlu alanda dönen manyetik alanla serbest bırakabilmektedir [60]. Şekil 4'de farklı bobin tiplerinden oluşan elektromanyetik aktüatör sistemlerine yer verilmiştir. Mikrorobotun üç boyutlu (3B) gerçek zamanlı pozisyonu ve oryantasyon takibi, damarlardaki mikrorobot geometrisinin mikro boyutu, çatallanma ve kırılmalık nedeniyle klinik uygulamalarda kesin geri besleme kontrolü için bir zorluk olmaya devam etmektedir. Bu nedenle Nguyen ve arkadaşları, harici bir elektromanyetik aktüatör sistemi tarafından yönlendirilen insansız mikrorobotik cerrahi için 3 boyutlu duruş tanıma yöntemi önermiştir. Çift kanatlı bir X-ışını görüntüleme cihazı ile görüntülenen mermi şeklindeki bir mikrorobot, EMA sistemi ile damar şeklindeki bir fantomda

hareket ettirilmiştir [61]. Li ve arkadaşları, tümör terapisinde ilaç verilmesi için makro aralığı olan büyük damarlarında elektromanyetik aktivasyon ve mikro aralığı olan küçük damarlarda bakteriyel aktivasyon ile birleştirilmiş hibrit aktüatörlü bir mikrorobot önermişlerdir. Bu amaçla ürettikleri bakteriyobot adlı mikrorobot, x ve y ekseninde iki çift Helmholtz bobini ve iki çift Maxwell bobininden ve z ekseninde bir çift Helmholtz bobininden oluşan bir EMA sistemi ile 2 boyutlu olarak hareket ettirilmiştir [56]. Go ve arkadaşları, termo-elektromanyetik olarak çalıştırılan bir mikrorobot kullanılarak terapötik ajanların hedefli taşınmasını önermişlerdir. Özellikle yönlendirme sırasında, çekme ve yuvarlanma hareketleri, mikrorobotun sırasıyla katlanmış ve katlanmış şekillerine uygulanmaktadır. EMA Sistemi, mikro-mıknatis, mıknatıslanma eğrisi, hareket hızı ve şekil değiştirme davranışı bakımından karakterize etmişlerdir [62]. Fu ve arkadaşları, vidalı jet mekanizmalı manyetik tahrikli bir mikrorobottan, bir EMA sisteminden ve bir konumlandırma sisteminden oluşan manyetik tahrikli bir kapsül mikrorobotik sistem önermişlerdir. Bir O-ring mıknatısı gömülü manyetik olarak çalıştırılan mikrorobot, tıbbi teşhis veya ilaç taşıma gibi belirli bir görevi yerine getirme potansiyeline sahiptir. EMA sistemi, boru içerisindeki temel hareketin gerçekleştirilmesinde Maxwell bobinine ihtiyaç duyulmadan parçanın döndürülerek sıvı içerisinde vida hareketiyle ilerlemesi için dönel bir manyetik alan oluşturan üç eksenli Helmholtz bobinlerinden oluşur. Konumlandırma

sistemi, borudaki manyetik olarak çalıştırılan mikrorobotun pozunu tespit etmek için kullanılmıştır [63].

#### 4. Sonuçlar

Mikrorobotlar milimetre altı boyutları ile büyük kapsamlı ameliyatları ya da tedavileri, küçük kesilerden yapılabilecek hale dönüştürmeleri ve temassız kontrol edilebiliyor olmaları açısından umut vadetmektedir. Elektromanyetik sistemler, üretilen mikrorobotları, farklı bobin konfigürasyonları ile hedef bölgeye yönlendirme açısından uygun olan kuvvetleri ve momentleri yaratmaları açısından avantaj sağlayan sistemlerdir. Bu sayede, hastaların operasyonun yan etkilerinden mümkün olduğunca az etkilenmesi sağlanacaktır. Ayrıca görüntüleme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte mikrorobotların vücut içerisindeki konumları hassas bir şekilde bilinebilecektir. Konumu bilinen mikrorobotlar kontrol algoritmalarının da yardımıyla çok daha hassas operasyonlar gerçekleştirilebilecektir. Tüm bu özelliklerin yanında operasyonların uzaktan ve temassız olarak gerçekleştirilmesi, Health 4.0 kapsamında o konudaki uzman hekimlere uzaktan erişebilme imkanı sağlayacaktır. Literatürdeki gelişmeler, elektromanyetik aktüatör sistemlerinin gelecekte mikro yapıdaki robot ve parçacıkları tanı ve tedavi amaçlı insan vücudu içerisinde yönlendirmek için sağlık kuruluşlarında aktif olarak kullanılmaya başlayacağı izlenimini vermektedir. Bunun haricinde manyetik mikrorobotlarda, mikrometre boyutunda yüksek performanslı mikrorobotlar oluşturmak için güçlü manyetizasyona sahip olan ve biyoyumlu ve muhtemelen biyolojik olarak parçalanabilen yeni manyetik mikro ve nanomateryallere ihtiyaç vardır [31]. Metinde biyolojik yapıda olmayan mikrorobot diye tanımladığımız geleneksel mikrorobotun üretimi, mikro boyutlar hassas ve maliyetli işlemler gerektirdiğinden biyolojik yapıya manyetik özellik kazandırılarak üretilen mikrorobotların manipülasyonuna yönelmek araştırmacılara daha makul görünmeye başlamıştır. Hedef bölgede mikrorobotun yapılacağı işlem bazı hassasiyet, kontrol ve stabilite durumlarına daha çok odaklanılmalıdır. Manyetik parçacık bazı görüntüleme metotları sayesinde, in vivo olarak ulaşılması ve görüntülenmesi zor bölgeler için ileriye dönük birçok çalışma alanı ortaya çıkacağı ön görülmektedir.

#### Kaynaklar

[1] Melloul, E., et al. (2016). Guidelines for perioperative care for liver surgery: enhanced recovery after surgery (eras) society recommendations. *World J. Surg.* 40(10), 2425–2440.  
 [2] Hernández-Vaquero, D., Fernández-Fairen, M., Torres-Perez, A., Santamaría, A. (2012). Minimally invasive surgery versus conventional surgery. A review of the scientific evidence. *Rev. Española Cirugía Ortopédica y Traumatol.* 56(6), 444–458.  
 [3] Luo, X., Mori, K., Peters, T. M. (2018). Advanced endoscopic navigation: surgical big data, methodology, and applications. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 20, 221–251.  
 [4] Miller, T. E., Mythen, M. (2014). Successful recovery after major surgery: moving beyond length of stay. *Perioper.*

*Med.* 3(1), 3–5.  
 [5] Glasgow, R.E., Adamson, K.A., Mulvihill, S.J. (2004). The benefits of a dedicated minimally invasive surgery program to academic general surgery practice. *J. Gastrointest. Surg.* 8(7), 869–873.  
 [6] Choi, P.J., Oskouian, R.J., Tubbs, R.S. (2018). *Telesurgery : past , present , and future.* 10(5), 1–5.  
 [7] Zemmar, A., Lozano, A.M., Nelson, B. J. (2020). The rise of robots in surgical environments during COVID-19. *Nat. Mach. Intell.* 2(10), 566–572.  
 [8] Kim, H., Julius, A.A., Kim, M.J. (2017). *Obstacle avoidance for bacteria-powered microrobots*, 2nd ed. Elsevier Inc.  
 [9] Sun, B., Wood, G., Miyashita, S. (2020). Milestones for autonomous in vivo microrobots in medical applications. *Surgery.* 2–5.  
 [10] P. Engineering and F. O. F. Engineering, (1963). *Micromanipulators and By.*  
 [11] Walckiers, L. (2010). Magnetic measurement with coils and wires. *CAS 2009 - Cern Accel. Sch. Magnets, Proc.* 357–385.  
 [12] Soto, F., Wang, J., Ahmed, R., Demirci, U. (2020). *Medical micro/nanorobots in precision medicine.* *Adv. Sci.* 7(21), 1–34.  
 [13] Sitti, M. et al. (2015). Biomedical applications of untethered mobile milli/microrobots. *Proc. IEEE.* 103(2), 205–224.  
 [14] Ceylan, H., Giltinan, J., Kozielski, K., Sitti, M. (2017). Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab Chip.* 17(10), 1705–1724.  
 [15] Sitti, M. (2009). Miniature devices: voyage of the microrobots. *Nature.* 458(7242), 1121–1122.  
 [16] Li, J. et al. (2018). Development of a magnetic microrobot for carrying and delivering targeted cells. *Sci. Robot.* 3(19), 1–12.  
 [17] Li, X., Fukuda, T. (2020). Magnetically guided micromanipulation of magnetic microrobots for accurate creation of artistic patterns in liquid environment. *Micromachines.* 11(7).  
 [18] Steager, E. B., Selman Sakar, M., Magee, C., Kennedy, M., Cowley, A., Kumar, V. (2013). Automated biomanipulation of single cells using magnetic microrobots. *Int. J. Rob. Res.* 32(3), 346–359.  
 [19] Metin, S. et al. (2015). Biomedical applications of untethered mobile milli/microrobots. *Proc IEEE Inst Electr Electron Eng.* 103(2), 205–224.  
 [20] Yesin, K.B., Vollmers, K., Nelson, B.J. (2006). Actuation, sensing, and fabrication for in vivo. *Exp. Robot.* 9, 321–330.  
 [21] Jeong, S., Choi, H., Cha, K., Li, J., Park, J.O., Park, S. (2011). Enhanced locomotive and drilling microrobot using precessional and gradient magnetic field. *Sensors Actuators, A Phys.* 171(2), 429–435.  
 [22] Lee, S. et al. (2018). A capsule-type microrobot with pick-and-drop motion for targeted drug and cell delivery. *Adv. Healthc. Mater.* 7(9), 1–6.  
 [23] Paek, J., Cho, I., Kim, J. (2015). Microrobotic tentacles with spiral bending capability based on shape-engineered elastomeric microtubes. *Sci. Rep.* 5, 1–11.  
 [24] Kim, E. et al. (2020). A magnetically actuated microrobot for targeted neural cell delivery and selective connection of neural networks. *Sci. Adv.*, 6(39), 1–12.



- [25] Ullrich, F. et al. (2013). Mobility experiments with microrobots for minimally invasive intraocular surgery. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 54(4), 2853–2863.
- [26] Jeon, S. et al. (2019). A magnetically controlled soft microrobot steering a guidewire in a three-dimensional phantom vascular network. *Soft Robot.* 6(1), 54–68.
- [27] Niedert, E. E. et al. (2020). A tumbling magnetic microrobot system for biomedical applications. *Micromachines.* 11(9).
- [28] Chen, C., Chen, L., Wang, P., Wu, L.F., Song, T., (2019). Steering of magnetotactic bacterial microrobots by focusing magnetic field for targeted pathogen killing. *J. Magn. Mater.* 479(6), 74–83.
- [29] Pena-Francesch, A., Giltinan, J., Sitti, M., (2019). Multifunctional and biodegradable self-propelled protein motors. *Nat. Commun.* 10(1), 1–10.
- [30] Koshinaga, M. et al. (2003). Brain cell transplantation. *日大醫學雜誌.* 62(8), 380–385.
- [31] Sitti, M., Wiersma, D.S. (2020). Pros and cons: magnetic versus optical microrobots. *Adv. Mater.* 32(20).
- [32] Zhang, H., Hutmacher, D.W., Chollet, F., Poo, A.N., Burdet, E. (2005). Microrobotics and MEMS-based fabrication techniques for scaffold-based tissue engineering. *Macromol. Biosci.* 5(6), 477–489.
- [33] Kummer, M.P., Abbott, J.J., Kratochvil, B.E., Borer, R., Sengul, A., Nelson, B.J. (2010). Octomag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation. *IEEE Trans. Robot.* 26(6), 1006–1017.
- [34] Kim, S., Lee, S., Lee, J., Nelson, B.J., Zhang, L., Choi, H. (2016). Fabrication and manipulation of ciliary microrobots with non-reciprocal magnetic actuation. *Sci. Rep.* 6, 1–9.
- [35] Jeong, S., Choi, H., Ko, S.Y., Park, J.O., Park, S. (2012). Remote controlled micro-robots using electromagnetic actuation (EMA) systems. *Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics.* 482–487.
- [36] Kong, K., Yim, S., Choi, S., Jeon, D. (2012). A Robotic Biopsy Device for Capsule Endoscopy. *J. Med. Devices, Trans. ASME.* 6(3), 1–9.
- [37] Joseph, J.V., Oleynikov, D., Rentschler, M., Dumpert, J., Patel, H.R.H. (2008). Microrobot assisted laparoscopic urological surgery in a canine model. *J. Urol.* 180(5), 2202–2205.
- [38] Palagi, S., Fischer, P. (2018). Bioinspired microrobots. *Nat. Rev. Mater.* 3(6), 113–124.
- [39] Nguyen, V.D., Le, V.H., Kim, C., Han, J., Park, J., Choi, E. (2018). 7th IEEE Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob), IEEE, Piscataway, , pp. 55–60
- [40] Ghanbari, A., Bahrami, M. (2011). A novel swimming microrobot based on artificial cilia for biomedical applications. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.* 63(3–4), 399–416.
- [41] Nourmohammadi, H., Keighobadi, J. (2014). Design, modelling and control of a manoeuvrable swimming microrobot. *IFAC.* 19(3).
- [42] Cho, S., Park, S.J., Ko, S.Y., Park, J.O., Park, S., 2012. Development of bacteria-based microrobot using biocompatible poly (ethylene glycol). *Biomed. Microdevices.* 14(6), 1019–1025.
- [43] Chen, W., Sun, M., Fan, X., Xie, H. (2020). Magnetic/pH-sensitive double-layer microrobots for drug delivery and sustained release. *Appl. Mater. Today.* 19, 100583.
- [44] Yu, C., Choi, H., Park, J., Park, S. (2009). Three-dimensional electromagnetic actuation system for intravascular locomotion. *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS.* 1, 540–545.
- [45] Kwon, J.O., Yang, J.S., Chae, J.B., Chung, S.K. (2014). Micro-object manipulation in a microfabricated channel using an electromagnetically driven microrobot with an acoustically oscillating bubble. *Sensors Actuators, A Phys.* 215, 77–82.
- [46] Nam, J., Jeon, S., Kim, S., Jang, G. (2014). Crawling microrobot actuated by a magnetic navigation system in tubular environments. *Sensors Actuators, A Phys.* 209, 100–106.
- [47] Kee, H., Lee, H., Choi, H., Park, S. (2020). Analysis of drivable area and magnetic force in quadrupole electromagnetic actuation system with movable cores. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 161, 107878.
- [48] Zarrouk, A., Belharet, K., Tahri, O. (2020). Vision-based magnetic actuator positioning for wireless control of microrobots. *Rob. Auton. Syst.* 124.
- [49] Nakamura, S., Harada, K., Sugita, N., Mitsuishi, M., Kaneko, M. (2011). Electromagnetic drive of microrobot geometrically constrained in blood vessel. *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS.* 6664–6667.
- [50] Fu, Q., Guo, S., Yamauchi, Y., Hirata, H., Ishihara, H. (2015). A novel hybrid microrobot using rotational magnetic field for medical applications. *Biomed. Microdevices.* 17(2).
- [51] Jeon, S. et al. (2019). A magnetically controlled soft microrobot steering a guidewire in a three-dimensional phantom vascular network. *Soft Robot.* 6(1), 54–68.
- [52] Peyer, K.E., Zhang, L., Nelson, B.J. (2013). Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications. *Nanoscale.* 5(4), 1259–1272.
- [53] Han, J. et al. (2016). Hybrid-Actuating macrophage-based microrobots for active cancer therapy. *Sci. Rep.* 6, 1–10.
- [54] Kim, S. et al. (2013). Fabrication and characterization of magnetic microrobots for three-dimensional cell culture and targeted transportation. *Adv. Mater.* 25(41), 5863–5868.
- [55] Nelson, B.J., Kaliakatsos, I.K., Abbott, J.J. (2010). Microrobots for minimally invasive medicine. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 12, 55–85.
- [56] Li, D. et al. (2015). A hybrid actuated microrobot using an electromagnetic field and flagellated bacteria for tumor-targeting therapy. *Biotechnol. Bioeng.* 112(8), 1623–1631.
- [57] Hoang, M.C. et al. (2019). A wireless tattooing capsule endoscope using external electromagnetic actuation and chemical reaction pressure. *PLoS One.* 14(7), 1–17.
- [58] Jeong, J., Jang, D., Kim, D., Lee, D., Chung, S.K. (2020). Acoustic bubble-based drug manipulation: Carrying, releasing and penetrating for targeted drug delivery using an electromagnetically actuated microrobot. *Sensors Actuators, A Phys.* 306, 111973.
- [59] Go, G. et al. (2015). ( 4 Coils ) for 3-D Locomotive Microrobot. *IEEE Trans. Magn.* 51(4).
- [60] Choi, K., Jung, G., Jeon, S., Nam, J. (2014). Capsule-type magnetic microrobot actuated by an external magnetic field for selective drug delivery in human blood vessels. *IEEE Transactions on Magnetics.* 50(11).

- [61] Nguyen, P.B. et al. (2018). Real-time microrobot posture recognition via biplane X-ray imaging system for external electromagnetic actuation. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 13(11), 1843–1852.
- [62] Go, G., Du Nguyen, V., Jin, Z., Park, J.O., Park, S. (2018). A thermo-electromagnetically actuated microrobot for the targeted transport of therapeutic agents. *Int. J. Control. Autom. Syst.* 16(3), 1341–1354.
- [63] Fu, Q., Zhang, S., Guo, S., Guo, J. (2018). Performance evaluation of amagnetically actuated capsulemicrorobotic system for medical applications. *Micromachines.* 9(12), 1–16.