

Neuroscope Sisteminin Model Tabanlı Sınaması

Model Based Verification of Neuroscope System

*Bengisu Uzun¹, Tolga Ayav¹, M. İ. Can Dede², Mustafa Berker³, İlkay Işıtkay³
Şahin Hanalioğlu³, Barbaros Özdemirel⁴, Gökhan Kiper², Enver Tatlıcıoğlu⁴
Omar W. Maaroo², Oğulcan Işıtman², Gizem Ateş², Abdullah Yaşır²*

¹Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir
{BengisuUzun, TolgaAyav}@iyte.edu.tr

²Makina Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir
{CanDede, GokhanKiper, OmarMaaroo, OgulcanIsitman, GizemAtes, AbdullahYasir}@iyte.edu.tr

³Beyin ve Sinir Cerrahisi Ana Bilim Dalı
Hacettepe Üniversitesi, Ankara
MBerker@hacettepe.edu.tr, {IlkayIsikay, SahinHanalioğlu}@gmail.com

⁴Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir
{BarbarosOzdemirel, EnverTatlicioglu}@iyte.edu.tr

Özetçe

NeuRoboScope projesinde, endoskopik hipofiz cerrahisinde kullanılan optik-kamera sisteminin, cerrahin kullandığı cerrahi aletleri takip ederek yönlendirilmesini amaçlayan emniyet kritik bir sistemin tasarlanması amaçlanmıştır. Bu bildiri, sistem gereksinimleri üzerinden tüm sistemin modellenmesini ve oluşturulan bu modelin sınanmasını ele almaktadır. Böylece, tasarım evresinden önce tasarımın dayanağı olan sistem gereksinimlerinin doğrulanması hedeflenmiştir. Sistem bir zamanlı otomat ağı olarak modellenmiş ve UPPAAL model sınama aracı kullanılarak, sistemin başta emniyet kritik olmak üzere diğer önemli özellikleri sınanmıştır.

Abstract

In the NeuRoboScope project, it is aimed to design a safety-critical system that navigates the optical-camera system used in the endoscopic pituitary surgery by tracking the surgery tool that the surgeon uses. This study presents modeling the system upon the requirements and verification of this model, which allows to validate the system requirements before the design phase. Using UPPAAL model checking tool, the entire system is modeled as a network of timed automata and verified against the vital system properties, including particularly the safety critical ones.

1. Giriş

Toplumda sık görülen ve önemli sağlık problemlerine yol açan hipofiz tümörlerinin çağdaş cerrahi tedavi yöntemi olan endoskopik hipofiz cerrahisi, mikroskobik ve kafatası açılarak uygulanan yöntemlere göre daha üstün bir tedavi ve maliyet etkinliğine sahiptir. Bu ameliyatta endoskop adı verilen optik sistem, cerrah tarafından hastanın burun deliğinden içeri ilerletilerek önce burun boşluğuna, oradan da hipofiz bezinin yerleştiği, kafatabanında sella turcica adı verilen eyer şeklindeki çukurun hemen önündeki sfenoid sinüse (hava boşluğu) ulaşmak suretiyle görüntü elde edilmektedir. Yine burun deliğinden içeri ilerletilen özel cerrahi aletlerle hipofiz bezindeki tümör temizlenmektedir [1]. Son zamanlarda bilimsel yazında yer alan çalışmalarla, endoskopik hipofiz cerrahisinin mikroskobik cerrahiye göre daha yüksek tümör rezeksiyon oranları, daha iyi klinik sonuçlar, daha yüksek hasta konforu, daha kısa hastanede yatış süreleri sağladığı ve uzun dönemde sağlık ekonomisi açısından daha etkili ve verimli bir tedavi yöntemi olduğu ortaya koyulmuştur [2, 3, 4]. Bu nedenlerle endoskopik hipofiz cerrahisi gittikçe daha çok tercih edilen bir cerrahi yöntem olarak kendine yer bulmaktadır.

Bu ameliyat sırasında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, cerrahın bir elini devamlı olarak Şekil 1'de gösterildiği şekilde, görüntü sağlamak amacıyla kullanılan endoskop kontrolü için ayırmak zorunda olmasıdır. Bu durum, ortalama 2-4 saat süren ameliyat sırasında cerrahın yorulmasına ve tek elini kul-

lanması nedeniyle manevra kabiliyetinin ve verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu probleme çözüm olarak endoskobun asistan tarafından kontrol edilmesi, sabit endoskop tutucular [5], sesle ve farklı kullanıcı arayüzleri ile kumanda edilen robotik endoskop yönlendiriciler önerilmektedir [6, 7]. Şekil 1'de ameliyat sırasında cerrahın sol elinde endoskobu tutmak üzere iki elini de kullandığı ve ameliyat asistanının da cerraha en az bir elini kullanarak cerrahi başka bir aletle yardımcı olduğu durum gözlemlenmektedir. Bu şekildeki çalışma biçimi ameliyat sırasında sıklıkla gerekmektedir. Ancak sayılan yöntemlerin her birinin ciddi dezavantajları bulunması bu yöntemlerin klinik kullanımını sınırlandırmaktadır.

NeuRoboScope projesinin amacı, yukarıda bahsedilen yöntemlerden farklı ve üstün olarak cerrahın her iki elini ameliyat sırasında aktif ve verimli bir şekilde kullanmasını sağlayacak şekilde endoskop kontrolü için özel bir robot sistemi tasarlamak ve geliştirmektir.

Küresel medikal cihaz pazarı 289 trilyon doları aşmış bulunmaktadır. İlaç damara zerk eden cihazlardan ameliyat robotlarına ve derin beyin uyarı sistemlerine kadar çok geniş bir yelpazeye sahiptir. Medikal cihazların çoğu yazılım ve donanımın bir arada olduğu emniyet kritik sistemlerdir. A.B.D. Gıda ve İlaç Bakanlığı 2008'den 2012'ye kadar üretilen medikal cihazların %15'inin daha çok yazılım kaynaklı hatalar nedeniyle geri çağırıldığını rapor etmiştir. Bu cihazlardaki karmaşıklığın gün geçtikçe artıyor olması nedeniyle bu tablonun kötüleşmesi beklenmektedir. Emniyet kritik medikal cihazlar, hem hastanın yaşamını ve yaşam kalitesini korumak, hem de kullanıcı ve çevreyi korumak için belirli standartları sağlamak zorundadır. NeuRoboScope da bu kapsamda değerlendirilmektedir. Bu projede, IEC 60601 uyarınca elektrikli olan cihazın temel güvenlik ve performans gereksinimlerinin, IEC 62304 standardı ile cihazın yazılımı ve yazılım yaşam çevrimi süreçlerinin kontrolü; ISO 14971 uyarınca da medikal risk yönetimi planlanmıştır. Diğer bir önemli standart olan DO-178C de aslında havacılık sektörü için tanımlanmış ancak tüm emniyet kritik sistemlerin yazılım geliştirme süreçleri ve özellikle güvenilirlik analizi, sınamaya ve doğrulama çalışmalarına odaklanmış olan bir standarttır [8].

Bu çalışmada, yukarıda anılan IEC 62304 ve DO-178C'nin bir gereği olarak tasarım öncesi sistem gereksinimlerinin sınaması konusu ele alınmaktadır. NeuRoboScope sisteminin gereksinimlerinden yola çıkılarak oluşturulan zamanlı otomat modeli bir model sınavıcı yardımıyla sınamakta ve sistemin çalışma prensibinin ve gereksinimlerin doğruluğu kanıtlanmaktadır.

Bir sonraki bölümde NeuRoboScope projesinin alt bileşenlerinin ve genel işleyişinin tanıtımı yer almaktadır. Bölüm 3, model tabanlı sınamaya tekniğini anlatmakta, Bölüm 4 ise NeuRoboScope'un zamanlı otomat modelini sunmaktadır. Bölüm 5 sistemin sınamasını ve sonuçları değerlendirmekte olup, Bölüm 6 ile çalışma sonuçlandırılmaktadır.

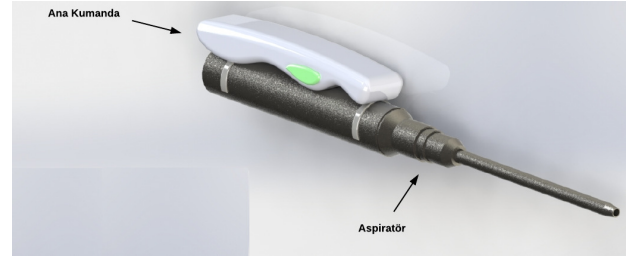
2. Neuroscope

Kısa adı NeuRoboScope olan Cerrahi Aletlerle Yönlendirilebilen Robot Yardımlı Endoskop Kontrol Sistemi projesinde bir teleoperasyon mimarisi oluşturulacaktır. Bu mimaride ana sistem ana kumanda sisteminin yer aldığı cerrahın kullandığı cerrahi aletlerden birisi olan aspiratördür. Ana kumanda sistemi ataletsel algılayıcılardan, işaretleri toplayıp bağımlı sisteme ile-



Şekil 1: Ameliyat sırasında cerrahın endoskobu tutuşu.

ten elektronik karttan ve dokunsal geribildirim cerraha ileten alt sistemden oluşmaktadır. Ana kumanda sisteminin aspiratöre monte edilmiş Şekil 2'de ifade edilmiştir. Cerrahın sağ elini kritik operasyonlar için kullandığı varsayıldığında mümkün olduğunca hareket bilgisi cerrahın sol eli ile kullandığı aletin üzerindeki ana kumanda sisteminden alınacaktır.

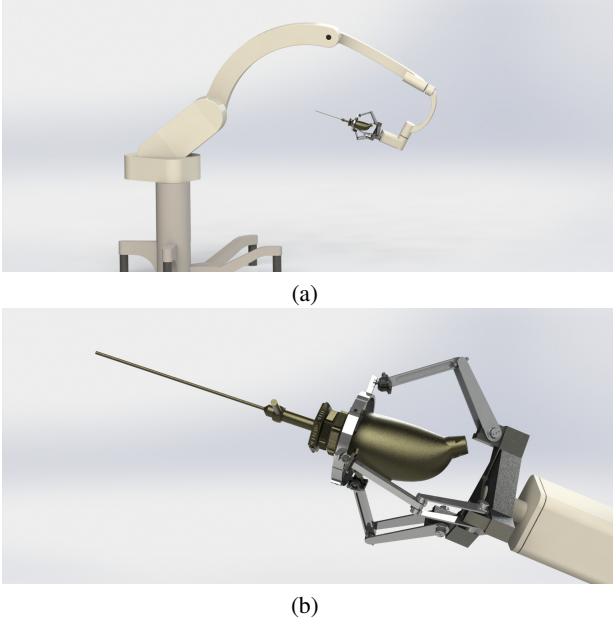


Şekil 2: Aspiratör aleti üzerindeki Ana Kumanda Sistemi.

Sistemdeki bağımlı sistem ise sonlandırıcısı endoskop olan robot koldur. Robot kol endoskobu ameliyat bölgesi içinde yönlendirmek için kullanılmaktadır. Bilimsel yazındaki diğer örneklerin aksine bağımlı sistem olan robot kol ameliyat bölgesine cerrah tarafından yerleştirilecektir ve gerektiğinde cerrah tarafından dışarı çıkarılacaktır. Bu sayede daha az kritik ama hızlı bir operasyon olan ameliyat bölgesine giriş ve çıkış işlemleri hızlandırılmış olacaktır. Bu şekilde çalışmanın bir diğer avantajı ise ameliyat sırasında beklenmedik bir arıza olması durumunda sistemin pasif olarak geriye sürülebilir olması ve ameliyat bölgesinden uzaklaştırılmasına izin vermesidir. Bağımlı sistem mekanik olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım endoskobun ameliyat bölgesine doktor tarafından konumlandırılmasına izin veren pasif olarak dengelenmiş ve pasif olarak geriye sürülebilir altı serbestlik dereceli taşıyıcı robot koldur. Diğeri ise ameliyat bölgesinde Ana Kumanda Sistemi tarafından iletilen görevi gerçekleştirecek tüm eksenleri aktif koldur. Şekil 3'de iki mekanizma da gösterilmiştir.

Cerrah endoskobun görüntü ayarlarını yaptıktan sonra sistemin ameliyat sırasındaki işleyişi şu şekildedir:

1. Cerrah endoskobu tutan robotu uç noktasından tutarak ameliyat bölgesine iletir. Bu safhada robotun hiçbir eksenini aktif değildir. Aktif kolun eyleyicileri ise çalışma



Şekil 3: (a) Pasif Kol ve üzerindeki Aktif Kol (b) Aktif Kol ve üzerindeki endoskop.

alanının ortasına denk düşecek şekilde frenlenmiş vaziyettedir. Endoskop ameliyat bölgesine girdikten sonra da pasif olarak yerçekimine karşı dengededir ve ortama kuvvet iletmemektedir.

2. Cerrah ameliyat sırasında endoskopun yönelimini veya mesafesini değiştirmek istediği takdirde ana sistem ile bağımlı sistem arasındaki bilgi alışverişini ana kumanda üzerindeki düğmeye basmak suretiyle aktive eder. Ana kumanda sistemi aktive olduğu süre boyunca hareket bilgileri paralel yapıya sahip aktif kola iletilerek endoskopun yönelimi ve ameliyat bölgesine mesafesi değiştirilir. Bu sırada endoskopun ortam ile etkileşimi algılandığında dokunsal geribildirim cerraha iletilir.
3. Endoskop istenilen konuma getirildiğinde düğme serbest bırakılır ve robot sistemi pasif olarak dengede konumunu korur.
4. Endoskopun merceği kirlendiğinde temizlik amacı ile cerrah tarafından ameliyat bölgesinden çıkarılır ve tekrar 1. adıma geri dönlür.

3. Model Tabanlı Sınama

Model Tabanlı Sınama (MTS) sistemin belirli bir kısmının veya tamamının soyutlanarak modellenmesini ve bu model üzerinden test edilmesini sağlayan formal bir tekniktir. Sınama işlemi temelde kapsamlı bir durum uzayı aramasıyla yapılır. Örneğin, "Reaktör sıcaklığı 300°C'yi aşmamalıdır" şeklindeki formal olmayan ifade, bir nükleer reaktör sisteminin en önemli güvenlik özelliklerinden biridir. Sistemin bu özelliğinin sınanması, sistemdeki olası tüm durumların incelenmesi ve her durumun bu özelliği sağladığının gösterilmesiyle olur [9].

MTS kapsamlı aramaya dayandığından, çok büyük ve

karmaşık sistemlerde karşılaşılan en büyük güçlük durum uzayı patlamasıdır. Bu durumda tam kapsamlı sınama yerine MTS'nin ürettiği karşı örneklerden yararlanılarak test verisi oluşturulabilir. Bu konu çalışmamızın kapsamı dışında olduğundan burada daha fazla detaylandırılmayacaktır.

MTS'nin formal olarak tanımlanmasında ve zamana dayalı mantığın açıklanmasında aşağıda tanımı verilen Kripke yapısı sıklıkla kullanılır.

Tanım 1 (Kripke yapısı). Kripke yapısı $K = (S, S_0, T, L)$ şeklinde tanımlanan bir gruptur. Burada,

- S sonlu durum kümesini,
- $S_0 \subseteq S$ başlangıç durumunu,
- $T \subseteq S \times S$ durumlar arası geçiş ilişkilerini,
- $L: S \Rightarrow 2^{AP}$ her bir duruma karşılık gelen ve ilgili durumda geçerli olan atomik önermeleri tanımlayan bir etiketleme işlevidir.

Kripke yapısıyla tanımlanan bir sistemin özellikleri Kısım 3.2'de gösterilen zamansal mantık kullanılarak formüle edilir. MTS'nin güçlü yönleri şu şekilde sıralanabilir [10]:

- Geniş bir yelpazede, örneğin yazılım mühendisliği, gömülü sistemler veya donanım tasarımı gibi farklı uygulamalar için kullanışlıdır.
- Kısmi sınamayı destekler, dolayısıyla sistem özellikleri birbirinden bağımsız olarak sınanabilir.
- Niteliği geçersiz kılınmış bir örnek hakkında tanılayıcı bilgi sağlar, hata ayıklamaya oldukça yardımcıdır.

Buna karşın MTS'nin zayıf yönleri ise aşağıdaki gibidir:

- Daha ziyade kontrol ağırlıklı uygulamalar için uygun olup, veri ağırlıklı uygulamalar için uygun değildir.
- Gerçek bir ürün veya prototip sistemi değil, sadece geçerli sistemin modelini sınar, bu nedenle elde edilen sonuç sistemin kendisinin sınanması kadar değerli değildir.

Neuroscope gerçek zamanlı bir sistem olduğundan, model olarak zamanlı otomatların kullanılması uygun görülmüştür. Bir sonraki kısımda zamanlı otomatlar açıklanmaktadır.

3.1. Zamanlı Otomat

Zamanlı otomat özellikle gerçek zamanlı sistemlerin ifadesinde ve tasarımında yaygın olarak kullanılan bir araçtır. X , gerçel değerli zaman değişkenlerini içeren sonlu bir kümeyi, V ise gerçel değerli veri değişkenlerini içeren sonlu bir kümeyi gösterebilir. Koşul \mathcal{K} şu şekilde tanımlanır:

$$\mathcal{K} := z \odot k \quad | \quad z - y \odot k,$$

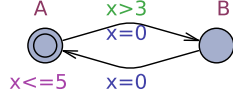
öyle ki $z, y \in X$ veya $V, k \in \mathbb{N}$ ve $\odot \in \{\leq, <, =, >, \geq\}$.

Tanım 2 (Zamanlı Otomat). $\mathcal{A} = (Q, q_0, X, \Sigma, \delta, I)$ şeklinde verilen bir gruptur. Burada,

- Q konumların sonlu kümesini,
- $q_0 \in Q$ başlangıç konumunu,
- X saat değişkenlerinin sonlu kümesini,

- Σ eylemler kümesini,
- $\delta \subseteq Q \times 2^K \times \Sigma \times 2^X \times Q$ konumlar arası geçişlerin kümesini,
- $I : Q \rightarrow 2^K$ konumlara atanan değişmezleri tanımlamaktadır.

Yukarıdaki tanıma göre, $\mathcal{A} = (\{A, B\}, A, \{x\}, \emptyset, \{(A, -, x > 3, x = 0, B), (B, -, -, -, A)\}, \{B : x \leq 5\})$ olarak verilen örnek bir otomatın çizimi Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4: Örnek zamanlı otomat modeli

İki konum ve bunlar arasında iki geçişe sahip bu otomatta x , saat değişkeni olarak tanımlanmıştır. Otomat başlangıç konumu A'da en fazla 5 birim zaman durabilir. A'dan B'ye geçiş ise saat 3'ten büyük olduğu sürece yapılabilir. Bu durumda otomat saat 3 ile 5 birim zaman arasındayken A'dan B'ye geçiş yapılabilir. B konumunda ise herhangi bir değişmez tanımlanmıştır ve ayrıca B'den A'ya geçişte de herhangi bir zamana bağlı koşul tanımlanmamıştır. Bu durumda otomat B'den A'ya herhangi bir zamanda geçebilir.

3.2. Tanımlama Dili

Sistemin özellikleri zamana bağlı mantıksal bir dil olan TCTL ile ifade edilirler. TCTL, CTL'in (Computation Tree Logic) saat değişkenleri eklenerek genişletilmiş olan bir türüdür.

Tanım 3 (TCTL Sözdizimi). Bir TCTL formülü φ tümevarımsal olarak aşağıdaki gramerle tanımlanır:

$$\varphi ::= \text{true} \mid p \mid \neg\varphi \mid \varphi \wedge \varphi \mid \varphi \exists \mathcal{U}_I \varphi \mid \varphi \forall \mathcal{U}_I \varphi.$$

Burada $p \in Pr$ atomik bir önerme ve/veya zaman değişkenlerini, $I \in \mathcal{I}$ ise φ 'de yer alan aralıklar kümesinin bir elemanı göstermektedir.

Yukarıda tanımlanan sözdizimine göre, bilimsel yazında yaygın olarak kullanılmakta olan ve aşağıda verilen işlemler türetilmiştir [11]:

$\exists \diamond \psi$ (Olası). Özellik ψ 'nin nihayetinde sağlandığı bir yol vardır

$\forall \square \psi$ (Devamlı). Özellik ψ her durumda sağlanmalıdır.

$\exists \square \psi$ (Olası her zaman). Özellik ψ 'nin bir yol boyunca tüm durumlarda sağlandığı en az bir yol vardır.

$\forall \diamond \psi$ (Sonunda). Özellik ψ nihayetinde sağlanmalıdır.

$\psi \rightsquigarrow \varphi$ (Neden olma). Özellik ψ sağlarsa, nihayetinde özellik φ de sağlanmalıdır.

$\psi \rightsquigarrow_{\leq t} \varphi$ (Zaman sınırlı neden olma). Özellik ψ sağlarsa, özellik φ de t süresi içerisinde sağlanmalıdır.

Yukarıda verilen sistem özelliklerinden bir kısmı emniyet kritik, bir kısmıysa sistemin canlılık işlevleriyle ilgilidir. Genel anlamda bir sistemin,

Emniyet Kritik Özellikleri şu yapıya sahiptir: “Kötü bir duruma asla izin verilmeyecek”. Örneğin ileride de açıklanacağı gibi, endoskopun ameliyat bölgesindeyken merkezleme işlemine başlaması kesinlikle yaşanmaması gereken bir durumdur. Bu tür özellikler sistemin güvenilirlik sınırlarını çizerler.

Canlılık Özellikleri şu yapıya sahiptir: “Bir şey eninde sonuna gerçekleşecek”. Örneğin, cerrahın kumanda birimi etkin (KBE) düğmesine basıp aspiratörü hareket ettirmesi sonucunda endoskopun da tanımlanan hareketi yapması beklenmektedir.

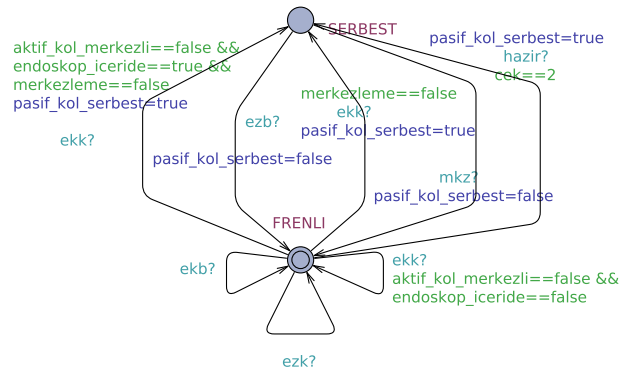
Zaman Sınırlı Canlılık Özellikleri. Gerçek zamanlı sistemlerde tek başına canlılık özellikleri yeterli olmamakta, özelliklerin belirli zaman sınırları içerisinde gerçekleşmesi anlamlı olmaktadır. Zaman sınırlı canlılık özelliği, zaman sınırlı neden olma işlevi $\varphi \rightsquigarrow_{\leq t} \psi$ ile gösterilir.

3.3. UPPAAL Model Sınayıcı

UPPAAL¹, zamanlı otomat modeline dayanan bir benzetim ve model sınaama aracıdır. Uppsala ve Aalborg Üniversiteleri tarafından geliştirilmiştir ve iletişim protokollerinden çoklu medya uygulamalarına kadar, hem endüstride hem de akademik projelerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu araç; değişkenler, yapılandırılmış veri tipleri, kullanıcı tanımlı özellikler ve kanal senkronizasyonu ile desteklenmiş zamanlı otomatlar olarak modellenmiş sistemlerin sınaanmasını sağlar [12].

4. Neuroscope Zamanlı Otomat Modeli

Bu bölümde NeuRoboScope'un zamanlı otomat modeli sunulacaktır. UPPAAL model sınayıcı haberleşme mekanizmasına sahip otomat ağlarını desteklemektedir. Buna göre, pasif kol, aktif kol ve endoskopun konumu ayrı otomatlarla modellenmiştir. Söz konusu otomatlar sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Hasta, cerrah ve cihazın güvenliği amaçlanarak baş-

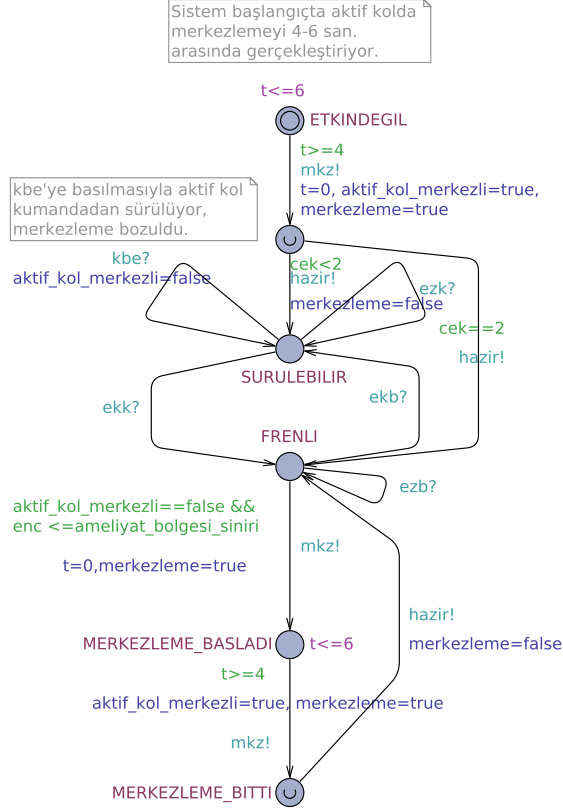


Şekil 5: Pasif kol modeli

langıç durumunda pasif kol FRENLİ durumdadır. Pasif kol SERBEST duruma ancak merkezlemenin olmadığı zamanda cerrahın endoskop kolunu kuvvetlice kavraması şartıyla geçebi-

¹www.uppaal.org

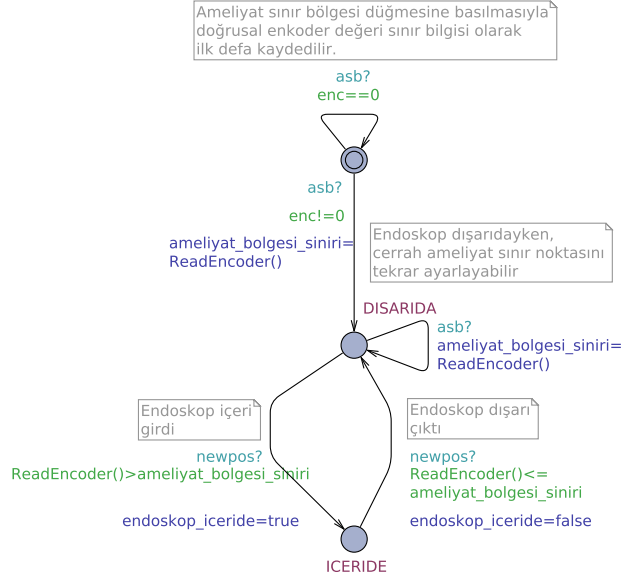
lir. Merkezleme süresince pasif kol daima FRENLİ durumda olmak zorundadır. Aktif kol ise sistem ilk çalışmaya başladığında



Şekil 6: Aktif kol modeli

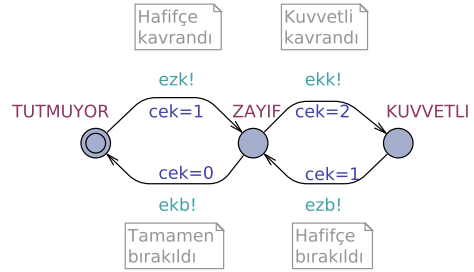
ETKİNDEĞİL durumundadır. Sistemin çalıştırılmaya başlanmasıyla merkezlenerek SÜRÜLEBİLİR durumuna geçer. Güvenlik amaçlı pasif kol SERBEST durumda olduğu sürece aktif kol her zaman FRENLİ durumda olmalıdır, aynı şekilde aktif kol SÜRÜLEBİLİR durumdayken pasif kol her zaman FRENLİ durumda olmalıdır. Aktif kolün merkezliliği doktorun endoskobu kumanda birimi tarafından sürmesiyle bozulur. Aktif kol ameliyat sınırı bölgesi dışına çıkıp FRENLİ konuma geçtikten sonra sistem tarafından otomatik olarak merkezlenir. Endoskop dışarıdayken aktif kol merkezleniyor olsa bile cerrah bu esnada endoskobun ucunu temizleyebilmektedir. Hastaların fizyolojisi farklılık gösterdiğinden, ameliyata başlamadan önce ameliyat bölgesi sınır bilgisi cerrah tarafından oluşturulur. Daha sonra endoskobun ameliyat sahası içinde olup olmadığı bilgisi enkoder değerinden okunarak belirlenir. Endoskop İÇERİDE durumundaysa aktif kolün merkezleme yapmasına izin verilmez. Ameliyat robotuna ilişkin yukarıda anlatılan bu üç otomatın dışında sistemdeki batarya, uyarı ışıkları v.b. ikinci derece öneme sahip bileşenlerin otomatları bu çalışmada yer darlığı nedeniyle sunulmamaktadır.

Neuroscope sisteminin sınanabilmesi için sistemin önemli bir parçası olan cerrahın davranışlarının da modellenmesi gereklidir. Burada genel yaklaşım, sistemi kullanan cerrahın herhangi bir kullanım senaryosuna bağlı olmadan her türlü hareketine izin verilmesi şeklindedir. Şekil 8 cerrahın endos-



Şekil 7: Endoskop konumunun modeli

kobu kavramasına ilişkin modeli göstermektedir. Bu model, cerrahın endoskobu sayısız kere ve dilediği zamanlarda tutup bırakabildiğini ifade etmektedir. Böylece, model sınavıcı olası her türlü kombinasyonu denemeye zorlanır. Benzer olarak, Şekil 9 cerrahın endoskobu pasif kolu tutarak sürüşünü, Şekil 10 ise acil durum, ameliyat sınırı bölgesi oluşturma ve kumanda birimi etkin düğmelerine basışını modellemektedir. Dikkat edilirse bu modellerde de tüm geçişler "herhangi bir zamanda koşulsuz" prensibine sahiptir.



Şekil 8: Cerrahın endoskobu tutmasına ilişkin model

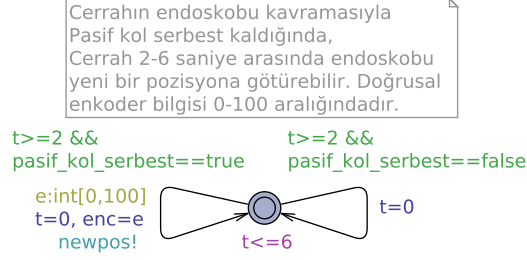
5. Sistemin Sınanması ve Değerlendirmeler

Sistemin emniyet kritik ve canlılık özelliklerinin sınanması için bir çok sorgu yazılmış olup yer darlığı nedeniyle burada sadece en önemlilerinden bir kaçısı sunulacaktır. İlk sorgu UPPAAL'e özgü olup sistemin kilitleyip kilitlemediğini sınar:

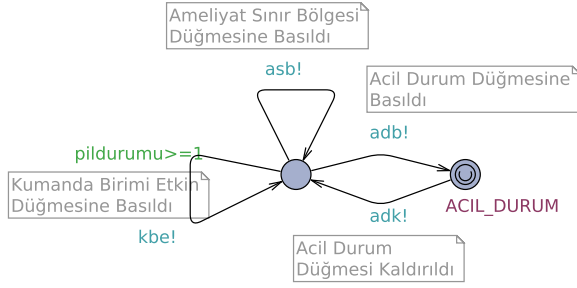
∇ □ not deadlock

Diğer bir önemli emniyet kritik sorgusu, endoskop ameliyat bölgesindeyken hiç bir durumda aktif kolün merkezleme işlemine başlamaması gerektiğini söyler:

∇ □ not (enc > ameliyat_bolgesi_siniri and AktifKol.MERKEZLEME_BASLADI)



Şekil 9: Cerrahin endoskopu sürmesine ilişkin model



Şekil 10: Cerrahin Kontrolü

Cerrah endoskopu tutmuyorken, hiç bir koşulda pasif kol serbest duruma geçmemelidir:

$\forall \square \text{not} (\text{CerrahEndoskopKavrama.TUTMUYOR} \ \text{and} \ \text{PasifKol.SERBEST})$

NeuRoboScope'un modeli yukarıda verilen sorgulardan başarılı bir şekilde geçmiştir. Sistemin yaşamsal işlevlerine ilişkin özellikler de sınanmalıdır. Örneğin, aktif kolun frenli olduğu bir durum mutlaka olmalıdır:

$\exists \diamond \text{AktifKol.FRENLI}$

Endoskopun cerrah tarafından ameliyat bölgesine götürüldüğü en az bir durum vardır:

$\exists \diamond \text{EndoskopBolgesi.ICERIDE}$

Aktif kolun merkezlemeyi yapıp yapamadığıysa şu sorguyla sınanabilir:

$\exists \diamond \text{AktifKol.MERKEZLEME_BITTI}$

Yukarıda örnekleri verilen sorgular sistem özelliklerinin formel olarak TCTL tanımlama dilinde ifadesidir. UPPAAL girdi olarak aldığı modeli diğer bir girdisi olan sorgulara karşı tam kapsamlı olarak sınar ve sistemin istenen özellikleri sağlayıp sağlamadığını söyler. Herhangi bir özelliğin sağlanmaması iki anlama gelebilir: i) sistem gereksinimlerinde bir hata vardır, ii) modellemede bir hata vardır. Dolayısıyla, böyle bir durumda geriye dönüp her iki olasılık da gözden geçirilir ve hatasız bir sistem/model elde edene kadar süreç devam ettirilir.

6. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, NeuRoboScope sisteminin model tabanlı sınaması gerçekleştirilmiştir. Sistem gereksinimler üzerinden zamanlı otomat olarak modellenmiş, oluşturulan model sistem özelliklerine karşı sınanmış ve sistem tüm sınamaları başarıyla geçmiştir. Model sınamaya çalışmaları sistemin tasarımı gerçek-

leştirildikten hemen sonra, uygulamaya geçilmeden önce güncellenerek tekrar edilecek, böylece tasarımın sınanması sağlanacaktır. Son olarak, model sınavıcıdan sistem tamamlandığında test aşamasında faydalanılması planlanmaktadır. Mutasyon analiziyle model sınavıcının ürettiği karşı örnekler test girişi olarak kullanılarak sistemin testleri gerçekleştirilecektir.

7. Teşekkür

Bu çalışmada sunulan araştırmaya verdiği destekten ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz (Proje Numaraları: 115E725 ve 115E726).

8. Kaynakça

- [1] Ricardo J. Komotar, Robert M. Starke, Daniel M S Raper, Vijay K. Anand, and Theodore H. Schwartz, "Endoscopic endonasal compared with microscopic transsphenoidal and open transcranial resection of giant pituitary adenomas," *Pituitary*, vol. 15, no. 2, pp. 150–159, 2012.
- [2] Edward R Laws, Judith M Wong, Timothy R Smith, Kenneth De Los Reyes, Linda S Aglio, Alison J Thorne, David J Cote, Felice Esposito, Paolo Cappabianca, and Atul Gawande, "A checklist for endonasal transsphenoidal anterior skull base surgery," *J Neurosurg*, pp. 1–6, 2015.
- [3] J P Almeida, L A De Albuquerque, M Dal Fabbro, M Sampaio, R Medina, M Chacon, and J Gondim, "Endoscopic skull base surgery: evaluation of current clinical outcomes.," *Journal Of Neurosurgical Sciences*, nov 2015.
- [4] Mustafa Berker, Ilkay Isikay, Dilek Berker, Miyase Bayraktar, and Alper Gürlek, "Early promising results for the endoscopic surgical treatment of Cushing's disease," *Neurosurgical Review*, vol. 37, no. 1, pp. 105–114, 2014.
- [5] M. O. Schurr, A. Arezzo, B. Neisius, H. Rininsland, H. U. Hilzinger, J. Dorn, K. Roth, and G. F. Buess, "Trocar and instrument positioning system TISKA: An assist device for endoscopic solo surgery," *Surgical Endoscopy*, vol. 13, no. 5, pp. 528–531, 1999.
- [6] M Wang, Y., Laby, K. P., Uecker, D. R., Mangaser, A. A. and Ghodoussi, "Automated Endoscope System For Optimal Positioning Patent No: US005878193A," 1999.
- [7] YJ Lee, J Kim, SY Ko, and WJ Lee, "Design of a compact laparoscopic assistant robot: KaLAR," *Iccas2003*, 2003.
- [8] *DO-178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification*, RTCA Inc., Washington, 2011.
- [9] Mordechai (Moti) Ben-Ari, "A primer on model checking," *ACM Inroads*, vol. 1, no. 1, pp. 40, 2010.
- [10] Christel Baier and Joost-Pieter Katoen, *Principles Of Model Checking*, vol. 950, 2008.
- [11] Dov M. Gabbay, Ian Hodkinson, and Mark Reynolds, *Temporal logic (vol. 1): mathematical foundations and computational aspects*, Oxford University Press, Inc., New York, NY, USA, 1994.
- [12] Gerd Behrmann, Re David, and Kim G. Larsen, "A tutorial on uppaal," 2004, pp. 200–236, Springer.