



## Pole placement and LQR control of slosh-free liquid transportation with dual-arm cooperative robot

Babak Naseri Soufiani<sup>ID</sup>, Mehmet Arif Adlı\*<sup>ID</sup>

Department of Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

### Highlights:

- Modeling and analysis of liquid transfer by dual-arm cooperative robots
- Obtaining closed-kinematic equations of dual-arm cooperative robot
- Utilizing Taylor Series Expansion function for linearizing of the system

### Keywords:

- Cooperative robot
- Liquid dynamics
- Closed kinematics
- LQR control
- Pole placement control

### Article Info:

Received: 13.03.2020

Accepted: 17.05.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.703520

### Correspondence:

Author: Mehmet Arif Adlı  
e-mail: arif.adli@gazi.edu.tr  
phone: +90 312 582 3418

### Graphical/Tabular Abstract

Nowadays, the usage areas and the roles of robots increase rapidly in daily life. Liquid transfer with robots is one of the topics which has recently been studied by researchers.

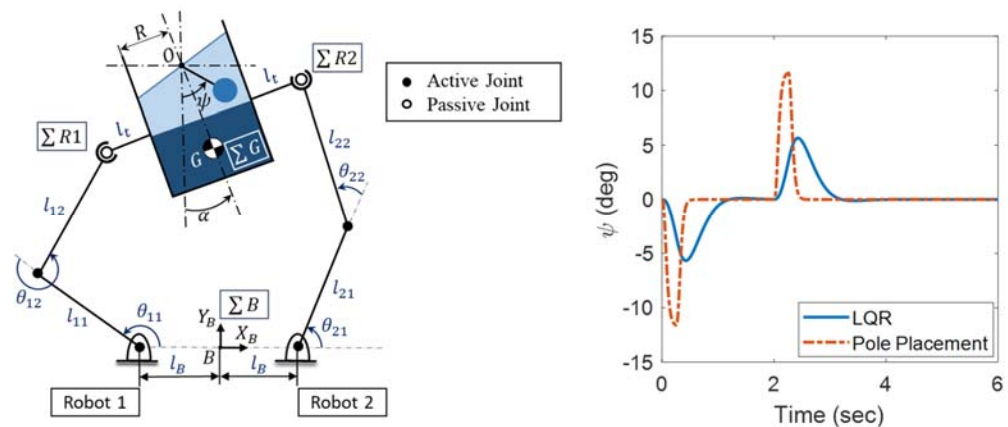


Figure A. Dual-arm cooperative robot carrying liquid-filled container without slosh

**Purpose:** The specific objective of this study was to transfer a liquid-filled container without slosh by a dual-arm cooperative robot.

### Theory and Methods:

A set of constraints were determined for a dual-arm cooperative robot when grasp liquid-filled container. The dynamics of the liquid slosh which was modeled as a simple pendulum was obtained by Lagrange equation. Then the obtained nonlinear dynamics of the slosh was linearized by Extended Taylor Series functions. In this study, pole Placement and Linear Quadratic Regulator (LQR) control techniques were used to achieve high-speed transport of the liquid-filled container without slosh.

### Results:

The results obtained from the analysis of liquid-filled container transfer are presented both control techniques (Pole placement and LQR) have been successful in suppression slosh of liquid during the transfer by the dual-arm robot. Undesirable forces and moments due to liquid slosh that effect the performance of fast liquid transfer have been eliminated by these two techniques.

### Conclusion:

Compared with pole placement control technique, LQR control technique has shown to be more successful in the elimination of liquid slosh. However, pole placement technique has managed to control the system in a shorter period than the LQR technique. In terms of control effort, LQR consumes less energy than pole placement.



## İki robot kol iş birliği ile çalkalanmadan sıvı taşımının kutup yerleştirme ve LQR kontrolü

Babak Naseri Soufiani<sup>ID</sup>, Mehmet Arif Adlı\*<sup>ID</sup>

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İki düzlemsel kooperatif robot kolu ile sıvı transferinin modellenmesi ve analizi
- İki kooperatif robot kolun kapalı kinematik denklemlerin elde edilmesi
- Sistemin doğrusallaştırılması için Genişletme Taylor Serisi fonksiyonunun kullanılması
- Çalkalanmadan sıvı taşımında, kutup yerleşimi ve LQR kontrol tekniklerinin karşılaştırılması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.03.2020

Kabul: 17.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.703520

### Anahtar Kelimeler:

Kooperatif robotlar,  
sıvı dinamiği,  
kapalı kinematik,  
LQR kontrolü,  
kutup yerleştirme kontrolü

### ÖZET

Günümüzde robotların günlük yaşamdaki kullanım alanları ve üstlendikleri roller hızla artmakta ve çeşitlilik göstermektedir. Robotlar ile sıvı taşıma işlemi de son zamanlarda üzerinde çalışma yapılmaya başlanan konular arasındadır. Bu makalede, içi sıvı dolu bir kabın iki düzlemsel robot kolu işbirliğiyle çalkalanmadan ve dökülmeden taşınması incelenmiştir. İki robotik kol herhangi bir nesneyi birlikte hareket ettirdiğinde, kinematik olarak kapalı bir zincir oluşur ve bu durum, ele alınan sistemin matematiksel olarak karmaşıklığını artıran bir dizi kısıtlamaların ortaya çıkmasına neden olur. Bu çalışmada, sıvı çalkalanmasının doğrusal olmayan dinamiği, Genişletilmiş Taylor Serisi fonksiyonları ile doğrusallaştırılmıştır. Ardından, sıvı dolu kabı çalkalanmadan, dökülmeden ve yüksek hızla taşımak için kutup yerleştirme (Pole Placement) ve doğrusal karesel düzenleyici (LQR) kontrol yöntemleri kullanılıp, bu iki yöntem sonuçları birbirleriyle teknik olarak karşılaştırılmıştır.

## Pole placement and LQR control of slosh-free liquid transportation with dual-arm cooperative robot

### H I G H L I G H T S

- Modeling and analysis of liquid transfer by a planar dual-arm cooperative robot
- Obtaining closed-kinematic equations of dual-arm cooperative robot
- Utilizing Taylor Series Expansion function for linearizing of the system
- Comparing pole placement and LQR control technics in transferring liquid container without slosh

### Article Info

Research Article

Received: 13.03.2020

Accepted: 17.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.703520

### Keywords:

Cooperative robot,  
liquid dynamics,  
closed kinematics,  
LQR control,  
pole placement control

### ABSTRACT

Nowadays, the usage areas and the roles of robots increase rapidly in daily life. Liquid transfer with robots is one of the topics which has recently been studied by researchers. In this paper, the transport of a liquid-filled container without slosh by a planar dual-arm cooperative robot was investigated. When a dual-arm robot carries an object, a closed kinematic chain is formed and a set of constraints that increase the mathematical complexity of the system appear during the motion. In this study, the nonlinear dynamics of the liquid slosh was linearized by Extended Taylor Series functions. Then, Pole Placement and Linear Quadratic Regulator (LQR) control techniques were used to achieve high-speed transport of the liquid-filled container without slosh and pouring, and the results of two techniques were compared with each other.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllardaki hızlı gelişmelerle birlikte robotların günlük yaşamdaki kullanım alanları ve üstlendikleri roller hızla artmakta ve çeşitlilik göstermektedir. Yakın gelecekte robotlar, hali hazırda yaptıkları endüstriyel ağırlıklı işlere ilaveten insanların yapmakta olduğu maharet gerektiren diğer pek çok işleri de yapacaktır. Robotlar ile sıvı taşıma işlemi de son zamanlarda bu kapsamda üzerinde çalışma yapılmaya başlanan konular arasındadır [1-3].

Çift kollu kooperatif robotlar, çoğunlukla tek bir robot koluyla kolayca yapılamayan işler için kullanılır. Tek kollu robotlarla karşılaştırıldığında, çift kollu kooperatif robotlar büyük veya ağır yükleri taşıyabilme kapasitesi, maharet, kıvraklık gibi önemli avantajlara sahiptir. Öte yandan bu önemli avantajlara karşın; kooperatif robotlar kinematik yapı olarak kapalı zincir oluşturduğundan seri topolojideki türdeşlerine nazaran matematiksel modelleri oldukça karmaşıktır. Ayrıca kooperatif robotlarda kapalı kinematik zincir sisteminden dolayı artıksal eyleyiciler (redundant actuation) ortaya çıkmaktadır. Kooperatif robotlar, sağlamış oldukları kullanım avantajları ve buna karşılık matematiksel modelleme konusundaki zorluklar nedeniyle literatürde farklı çalışmalarda karşımıza çıkmaktadır [4-8]. Bu çalışmalarda, birlikte çalışan robotların kinematik, dinamik modeli ve kuvvet kontrol ile ilgili yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmanın özgün yanını oluşturan “İki robot kolu ile sıvı taşınımı” konusunda literatürde teorik veya deneysel olarak yapılan akademik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Literatürde, sıvı çalkalanmasını önlemek için önerilen yöntemler aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bunlar içerisinde pasif yöntem, sıvının tabanına yerleştirilen bir engelin (baffle) [9-12] sıvının hareketi dolayısıyla oluşan kinetik enerjisini sönmülemeye yöneliktir. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda kinetik enerjisi sönmülemek için sıvı kabının çeşitli yerlerine yerleştirilen bu engellerin sıvının kinetik enerjisini azalttığı ama enerjisi tamamen sönmüleyemediğinden sıvıdaki çalkalanma miktarının tamamen engellenemediği gözlenmiştir. Pasif yöntemler, sıvıdaki çalkalanmayı tamamen gideremediğinden; araştırmacılar aktif yöntemler konusunda çalışmaya yönelmişlerdir. Bu konuda çeşitli modeller elde edilmiş ve bunlar içerisinde literatürde en sık kullanılan modeller: “sarkaç” [2, 3, 13, 14] ve “çoklu kütle yay modelleri”dir [1, 15, 16].

Sıvı dolu bir kabın transferi esnasında, kabın hızlanma ve yavaşlamasından dolayı sıvının serbest yüzeyinde çalkalanma meydana gelir. Sıvının çalkalanması, sıvıda istenmeyen kuvvetler ve momentlere neden olarak sıvı transfer sisteminin etkin performansını düşürür. Sıvıyı hızlıca taşımak için sıvıda oluşabilecek çalkalanmanın yok edilmesi gerekmektedir.

Literatürde sıvı taşınımı sırasında sıvıdaki çalkalanmayı engellemek için kullanılan aktif yöntemler de farklı tip

denetimciler denenmiştir: PID (Proportional Integral Derivative) kontrol [14], PD (Proportional Derivative) kontrol [17],  $H_\infty$  geri besleme kontrol [13, 18, 19], Lyapunov tabanlı geri besleme denetimci [1], integral kayan kip kontrol (ISMC) [20], kayan kip kontrol (SMC) [2, 21-23], giriş şekillendirici kontrol [3, 24] en sık kullanılan denetimciler arasındadır. Verilen referanslarda kullanılan denetimcilerle taşınan sıvının seviyesi veya sıvı kabın açısı kontrol edilmiştir. Robotlar ile sıvı taşınımı konusunda çok az sayıda çalışma literatürde mevcut olup; bunların hepsi tek robot kolu ile yapılan sıvı taşınımı ile ilgilidir [1, 3, 14]. Bu çalışmada, çalkalanma olmadan sıvı transferi yapabilen iki kooperatif robot kolu için kutup yerleştirme ve doğrusal karesel düzenleyici (LQR) teknikleri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu iki teknik, doğrusal kontrol sistemlerinde en çok kullanılan metotlar arasındadır.

Kutup yerleştirme tekniği, kapalı döngü sistemlerindeki kutupları kompleks düzlem üzerinde belirlenen yerlere yerleştirme yöntemidir [25, 26]. Bu geri besleme yöntemi, sistemin istenen şekilde davranmasını sağlar. Kutup yerleştirme tekniği, iki tekerlekli robotlar [27, 28], ters sarkaç [29, 30], uzay aracı (spacecraft) [31], otonom helikopter [32] gibi sistemlerin kontrol edilmesinde kullanılmıştır.

Doğrusal karesel düzenleyici (LQR) tekniği, dinamik bir sistemin minimum maliyetle çalıştırılmasını sağlamaktadır. LQR, otomatik olarak uygun bir geri besleme kazanç değeri olarak maliyet fonksiyonunun minimum şeklinde elde edilmesini sağlar [25, 26]. Uydudaki yakıt çalkalanmasını engelleme [33], taşıt süspansiyon sisteminin aktif titreşim kontrolü [34], ters sarkacın konum kontrolü [35, 36], insansız hava aracı [37], sıvı tankın çalkalanma kontrolü [38], Hibrit elektrikli aracın batarya şarjı [39] gibi uygulamalarda LQR tekniği kullanılmıştır.

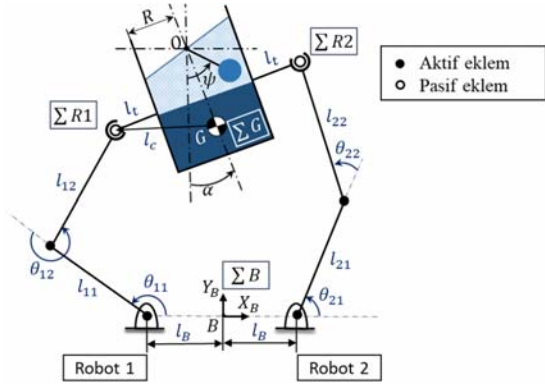
## 2. SİSTEM MODELLENMESİ (SYSTEM MODELING)

Bu bölümde, sistemin kinematik ve dinamik modeli özetlenmiştir. Şekil 1’de iki düzlemsel kooperatif robotik kol ve bunların uç işlevcilerinin beraber tuttuğu sıvı dolu bir silindirik kap gösterilmektedir. Robotların uç işlevcileri ile silindirik kabın kulpları arasındaki bağlantı, pasif bir mafsal bağlantısı olarak modellenmiştir. Kollar, eklemlere yerleştirilen eyleyiciler tarafından tahrik edilmektedir. Bu eyleyiciler şekilde aktif eklemler ile gösterilmektedir. Burada,  $\Sigma B$  ana eksen takımı,  $\Sigma R1$  ve  $\Sigma R2$  Robot 1 ve Robot 2’nin uç işlevcisindeki eksen takımlarıdır.  $\Sigma G$ , katı kütle (yani, kap ve sıvının çalkalanmayan kısmı) ağırlık merkezindeki eksen takımıdır.

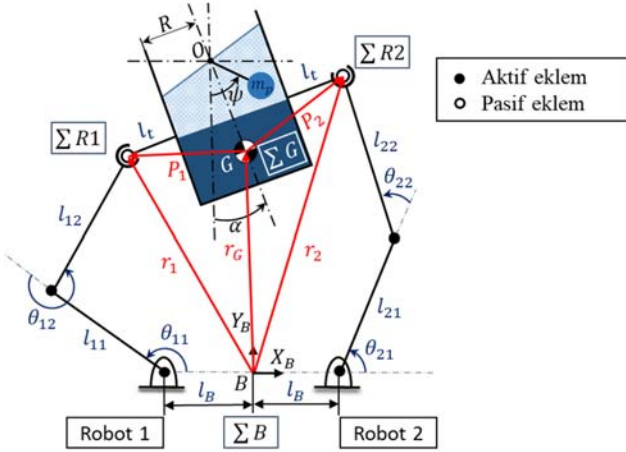
### 2.1. Sistemin Kinematiği (System Kinematics)

İki robotik kol bir nesneyi beraber hareket ettirdiğinde bu iki kolun konum, hız ve ivme değerleri belirli kinematik kısıtlara tabi olur. Bu kısıtlar Şekil 2 üzerinde  $P_1, P_2, r_1, r_2$  ve  $r_G$  vektörler ile gösterilmiştir. Modellenen sistem için bu

kısıtlara karşılık gelen kısıt denklemlerinin genel formu Eş. 1'de ve kısıt denklemlerinin seti Eş. 2 ve Eş.5 arasında verilmiştir.



**Şekil 1.** İki robot kolu ve sıvı kabın gösterimi  
(Dual-arm robot and liquid container)



**Şekil 2.** İki kooperatif robot, sıvı kap ve kısıtlama vektörlerin şematığı  
(Schematic of dual-arm cooperative robot, liquid container and constraint vectors)

$$\Phi_i(\mathbf{r}, \mathbf{q}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\phi_1 = x + l_B - l_{11} \cos \theta_{11} - l_{12} \cos(\theta_{11} + \theta_{12}) - l_c \cos(\beta - \alpha) \quad (2)$$

$$\phi_2 = y - l_{11} \sin \theta_{11} - l_{12} \sin(\theta_{11} + \theta_{12}) + l_c \sin(\beta - \alpha) \quad (3)$$

$$\phi_3 = x - l_B - l_{21} \cos \theta_{21} - l_{22} \cos(\theta_{21} + \theta_{22}) + l_c \cos(\beta - \alpha) \quad (4)$$

$$\phi_4 = y - l_{21} \sin \theta_{21} - l_{22} \sin(\theta_{21} + \theta_{22}) + l_c \sin(\beta - \alpha) \quad (5)$$

Burada  $\mathbf{r} = [x \ y \ \alpha]^T$ ,  $x$  ve  $y$  sıvının çalkalanmayan katı kısmının ağırlık merkezinin konum bileşenleri,  $\alpha$  kabın dikey eksene göre yaptığı açı ve  $\mathbf{q}_i = [\theta_{11} \ \theta_{12} \ \theta_{21} \ \theta_{22}]^T$  robot kolların eklem açılarıdır. Eş. 1'in zamana göre türevi alındığında eklem hızları  $\dot{\mathbf{q}}_i$  ( $i =$

1,2) ile kabın ağırlık merkezinin hızları  $\dot{\mathbf{r}}$  arasındaki ilişkiyi veren aşağıdaki denklemler elde edilir [40]:

$$\dot{\Phi}_i = \frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{r}} \dot{\mathbf{r}} + \frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{q}_i} \dot{\mathbf{q}}_i = 0 \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_i = -\left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{q}_i}\right)^{-1} \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{r}}\right) \dot{\mathbf{r}} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{J}_i \dot{\mathbf{r}} \quad (8)$$

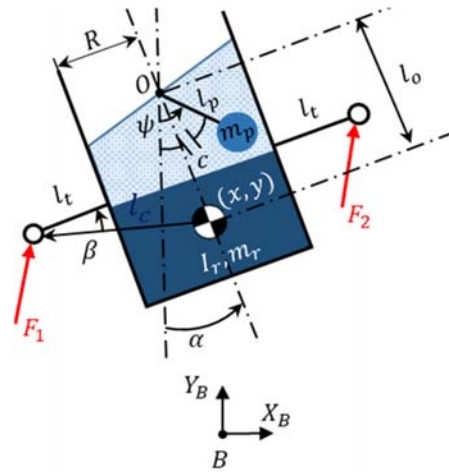
$$\mathbf{J}_i = \mathbf{J}_{ai}^{-1} \mathbf{J}_{oi} \quad (9)$$

Burada  $\mathbf{J}_{ai} = -\left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{q}_i}\right)$ ,  $\mathbf{J}_{oi} = \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{r}}\right)$  ve  $\mathbf{J}_i$  Jakobiyen matrisleridir. Eklemlerin ivmeleri ise Eş. 8'in türevi alınarak elde edilir.

$$\ddot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{J}_i \ddot{\mathbf{r}} + \dot{\mathbf{J}}_i \dot{\mathbf{r}} \quad (10)$$

## 2.2. Sistem Dinamiği (System Dynamics)

Silindirik bir kap içerisindeki sıvının çalkalanma modeli, sarkaç sistemi ile temsil edilebilmektedir. Sarkaç modeli kullanılarak, çalkalanmanın daha gerçekçi mekanik benzetimi için sonsuz sayıda sarkaç modelinin toplam etkisinin modellenmesi gerekmektedir. Görece sonsuz sayıda sarkaç kullanımı ile sarkacın ucunda kullanılan kütlelerin boyutu arasında ters ilişki vardır. Yani, sarkaç sayısı arttıkça kütle miktarları azalmaktadır. Bu ilişki nedeniyle, ilk temel moda karşılık gelen sıvının çalkalanma kısmı, tek bir kütle şeklinde modellenebilmektedir. Bu mühendislikte sıkça kullanılan küçük etkilerin ihmal edilebilirliği ilkesi uyarınca, sıvı çalkalanmasının basit bir ters sarkaç sistemi olarak kabul edilebilmesini sağlamaktadır. Geriye kalan, sıvının çalkalanmayan kısmı ve tank kütlesi ise tek bir rijit kütle gibi modellenmektedir [2]. Şekil 3'te silindirik kabın içinde sıvı çalkalanması, bir katı kütle ve bir sarkaç sistemi olarak gösterilmektedir. Sıvı çalkalanması ile kap cidarındaki viskozite ve sürtünme, sabit sönümleme katsayısı ile tanımlanmaktadır. Sistem parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



**Şekil 3.** Sıvı çalkalanmanın sarkaç modeli  
(Pendulum model of liquid slosh)

Lagrange yöntemi kullanarak hareket denklemini elde etmek mümkündür.

Sıvının çalkalanmayan kısmı ile kabın denklemi:

$$(m_r + m_p)\ddot{x} - m_p l_o \cos \alpha \ddot{\alpha} + m_p l_p \cos \psi \ddot{\psi} + m_p l_o \sin \alpha \dot{\alpha}^2 - m_p l_p \sin \psi \dot{\psi}^2 = f_{x1} + f_{x2} \quad (11)$$

$$(m_r + m_p)\ddot{y} - m_p l_o \sin \alpha \ddot{\alpha} + m_p l_p \sin \psi \ddot{\psi} - m_p l_o \cos \alpha \dot{\alpha}^2 + m_p l_p \cos \psi \dot{\psi}^2 + (m_r + m_p)g = f_{y1} + f_{y2} \quad (12)$$

$$(I_r + m_p l_o^2)\ddot{\alpha} - m_p l_o \cos \alpha \ddot{x} - m_p l_o \sin \alpha \ddot{y} - m_p l_o l_p \cos(\alpha - \psi) \ddot{\psi} - m_p l_o l_p \sin(\alpha - \psi) \dot{\psi}^2 + c(\dot{\alpha} - \dot{\psi}) - m_p l_o g \sin \alpha = \tau_{c1} + \tau_{c2} \quad (13)$$

Sıvının çalkalanma kısmının denklemi:

$$m_p l_p^2 \ddot{\psi} + m_p l_p \cos \psi \ddot{x} + m_p l_p \sin \psi \ddot{y} - m_p l_o l_p \cos(\alpha - \psi) \ddot{\alpha} + m_p l_o l_p \sin(\alpha - \psi) \dot{\alpha}^2 - c(\dot{\alpha} - \dot{\psi}) + m_p l_p g \sin \psi = 0 \quad (14)$$

Çalkalanmanın dinamik denklemi Eş. 15'teki gibi genel bir denklem halinde yazılabilir.

$$\mathbf{M}_o(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}_o(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{G}_o(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^2 \mathbf{J}_{oi}^T \mathbf{F}_i \quad (15)$$

Şekil 3'te verilen çalkalanma modelinde  $\mathbf{X} = [x \ y \ \alpha \ \psi]^T$  kap ve içindeki sıvının konumunu belirten vektörü,  $\mathbf{M}_o$  atalet matrisini,  $\mathbf{C}_o$  doğrusal olmayan kuvvetleri,  $\mathbf{G}_o$  yerçekimi kuvvetini,  $\mathbf{J}_{oi}$  Jakobiyen matrisini,  $\mathbf{F}_i = [f_{xi} \ f_{yi}]^T$  robotun uç işlevcisinden kaba uygulanan kuvvet ve momenti belirtmektedir.  $\dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}$  kap ve içindeki sıvının, ortak hız ve ivmesidir.

$$\mathbf{M}_o = \begin{bmatrix} m_r + m_p & 0 & -m_p l_o \cos(\alpha) & m_p l_p \cos(\psi) \\ 0 & m_r + m_p & -m_p l_o \sin(\alpha) & m_p l_p \sin(\psi) \\ -m_p l_o \cos(\alpha) & -m_p l_o \sin(\alpha) & I_r + m_p l_o^2 & -m_p l_o l_p \cos(\alpha - \psi) \\ m_p l_p \cos(\psi) & m_p l_p \sin(\psi) & -m_p l_o l_p \cos(\alpha - \psi) & m_p l_p^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{C}_o = \begin{bmatrix} m_p l_o \sin(\alpha) (\dot{\alpha})^2 - m_p l_p \sin(\psi) (\dot{\psi})^2 \\ -m_p l_o \cos(\alpha) \dot{\alpha}^2 + m_p l_p \cos(\psi) (\dot{\psi})^2 \\ c(\dot{\alpha} - \dot{\psi}) - m_p l_o l_p \sin(\alpha - \psi) (\dot{\psi})^2 \\ -c(\dot{\alpha} - \dot{\psi}) + m_p l_o l_p \sin(\alpha - \psi) (\dot{\alpha})^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{G}_o = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_r + m_p)g \\ -m_p l_o g \sin(\alpha) \\ m_p l_p g \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{J}_{o1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l_c \sin(\alpha - \beta) \\ 0 & 1 & -l_c \cos(\alpha - \beta) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{J}_{o2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_c \sin(\alpha + \beta) \\ 0 & 1 & l_c \cos(\alpha + \beta) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Elde edilen matrisler kullanılarak, çalkalanmanın doğrusal olmayan dinamiğinin durum uzay formu aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (21)$$

Burada

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \\ -\mathbf{M}_o^{-1} \mathbf{G}_{SD} & -\mathbf{M}_o^{-1} \mathbf{C}_o \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{M}_o^{-1} \mathbf{J}_o^T \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{G}_{SD} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(m_r + m_p)g}{y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{m_p l_o g \sin \alpha}{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m_p l_p g \sin \psi}{\psi} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{J}_o^T = [\mathbf{J}_{o1}^T \ \mathbf{J}_{o2}^T] \quad (25)$$

$$\mathbf{x} = [x \ y \ \alpha \ \psi \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\alpha} \ \dot{\psi}]^T \quad (26)$$

$$\mathbf{u} = [\mathbf{F}_1 \ \mathbf{F}_2]^T = [f_{x1} \ f_{y1} \ f_{x2} \ f_{y2}]^T \quad (27)$$

Sıvı dolu kabın doğrusal olmayan çalkalanma dinamiğinin Taylor Serisi kullanılarak doğrusallaştırılmıştır [41]. Doğrusallaştırılmış sistemin  $\mathbf{A}$  ve  $\mathbf{B}$  matrislerinin elemanları

şirasiyla,  $a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Big|_{x=\bar{x}, u=\bar{u}}$  ve  $b_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \Big|_{x=\bar{x}, u=\bar{u}}$ , sistemin denge

noktaları  $\bar{\mathbf{x}} = [\bar{x} \ \bar{y} \ 0 \ 0]^T$  ( $\bar{x}$  ve  $\bar{y}$  herhangi bir nokta olabilir) ve

$\bar{\mathbf{u}} = [0 \ (m_p + m_r)g/2 \ 0 \ (m_p + m_r)g/2]^T$ , dir.  $\mathbf{A}$  ve  $\mathbf{B}$  matrisleri ve bu matrislerin elemanlarının denklemleri Eş. 28 ve Eş. 52 arasında verilmektedir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & 0 & 0 & a_{57} & a_{58} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{73} & a_{74} & 0 & 0 & a_{77} & a_{78} \\ 0 & 0 & a_{83} & a_{84} & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \quad (28)$$

**Tablo 1.** Sistem parametreleri (System parameters)

Parametreler	Açıklama	Birim
$m_r$	Kap kütlesi ve sıvının çalkalanmayan kısmının toplam kütlesi	kg
$m_p$	Sıvının çalkalanan kısmının kütlesi (sarkacın kütlesi)	kg
$c$	Sönüm katsayısı	kg.m <sup>2</sup> /s
$l_p$	Sarkaç uzunluğu	m
$l_o$	Katı kütle merkezi ile O noktası arasındaki mesafe	m
$l_t$	Kap kolun uzunluğu	m
$R$	Silindirin yarıçapı	m
$\beta$	Kap kolu ile katı kütle arasındaki açı	rad
$F_i$	Robotlar tarafından kap kollarına uygulanan kuvvet vektörü	N
$x$	Katı kütlelerin ana koordinat çerçevesine göre yatay yönünde konumu	m
$y$	Katı kütlelerin ana koordinat çerçevesine göre dikey yönünde konumu	m
$\alpha$	Kabın dikey yönüne göre açısı	rad
$\psi$	Çalkalanma açısı veya sarkaç açısı	rad

$$a_{54} = \frac{m_p g}{m_r} \quad (29) \quad b_{51} = \frac{1}{m_r} \quad (41)$$

$$a_{57} = -\frac{c}{l_p m_r} \quad (30) \quad b_{71} = -\frac{1}{l_r} l_c \sin \beta \quad (42)$$

$$a_{58} = \frac{c}{l_p m_r} \quad (31) \quad b_{81} = -\frac{1}{l_r l_p m_r} (I_r + l_c l_o m_r \sin \beta) \quad (43)$$

$$a_{73} = \frac{1}{l_r} (m_p g l_o - m_p g l_c \sin \beta - m_r g l_c \sin \beta) \quad (32) \quad b_{62} = \frac{1}{m_p + m_r} \quad (44)$$

$$a_{74} = -\frac{m_p g l_o}{l_r} \quad (33) \quad b_{72} = -\frac{l_c \cos \beta}{l_r} \quad (45)$$

$$a_{77} = \frac{c(l_o - l_p)}{l_r l_p} \quad (34) \quad b_{82} = -\frac{l_c l_o \cos \beta}{l_r l_p} \quad (46)$$

$$a_{78} = -\frac{c(l_o - l_p)}{l_r l_p} \quad (35) \quad b_{53} = \frac{1}{m_r} \quad (47)$$

$$a_{83} = -\frac{g l_o}{l_r l_p} (m_p l_c \sin \beta - m_p l_o + m_r l_c \sin \beta) \quad (36) \quad b_{73} = -\frac{l_c \sin \beta}{l_r} \quad (48)$$

$$a_{84} = -\frac{g}{l_r l_p m_r} (m_p m_r l_o^2 + I_r m_p + I_r m_r) \quad (37) \quad b_{83} = -\frac{1}{l_r l_p m_r} (I_r + l_c l_o m_r \sin \beta) \quad (49)$$

$$a_{87} = \frac{c}{m_p m_r l_r l_p^2} (m_p m_r l_o^2 - m_p m_r l_p l_o + I_r m_p + I_r m_r) \quad (38) \quad b_{64} = \frac{1}{m_p + m_r} \quad (50)$$

$$a_{88} = -\frac{c}{m_p m_r l_r l_p^2} (m_p m_r l_o^2 - m_p m_r l_p l_o + I_r m_p + I_r m_r) \quad (39) \quad b_{74} = \frac{l_c \cos \beta}{l_r} \quad (51)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{51} & 0 & b_{53} & 0 \\ 0 & b_{62} & 0 & b_{64} \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & a_{74} \\ b_{81} & b_{82} & b_{83} & a_{84} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Eklemler uzayında iki robotun dinamik modeli Eş. 53'teki şekilde yazılabilir:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau - J^T u \quad (53)$$

Burada,  $M = \text{diag}[M_1 \ M_2]$  atalet matrisi,  $C = [C_1 \ C_2]^T$  doğrusal olmayan terimlerin vektörü,  $G = [G_1 \ G_2]^T$  yerçekimi kuvveti,  $J = \text{diag}[J_{a1} \ J_{a2}]$  Jakobiyen matrisi,  $\tau$  tork vektörü,  $u$  robotun uç işlevcisinden kaba uygulanan kuvvet ve moment vektörüdür. Ayrıca  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  sırasıyla eklemlerin konum, hız ve ivmesidir.

### 3. SİSTEM DENETİMCİLERİ (CONTROLLERS OF THE SYSTEM)

Modern kontrol sistemlerindeki tasarım tekniklerinin büyük bir kısmı durum geri besleme kavramına dayanır. Bu tasarım yönteminde, denetleyicinin işlevi durum değişkenlerini sabit kazançlarla geri beslemektir. Bir geri beslemeli kontrolör tasarımı çoğunlukla kutup yerleştirme ve doğrusal karesel düzenleyici (LQR) tekniklerine dayanmaktadır. Sıvı çalkalanma sistemi, entegratör içerdiğinden dolayı tip 1 servo sistemi olarak tasarlanmıştır [25].

#### 3.1. Kutup Yerleştirme Kontrolü (Pole Placement Control)

Kutup yerleştirme tasarımına geçmeden önce sistemin tüm durumlarının kontrol edilebilirliği analiz edilir. Bundan sonra kapalı döngü sistemin kutupları uygun bir durum geri besleme kazanç matrisi yoluyla istenen herhangi bir yere yerleştirilir [25].

Kutup Yerleştirme tekniğinin tasarımı için Eş. 54'teki gibi bir durum uzay sistemi dikkate alınır:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (54)$$

Burada  $\mathbf{x} \in R^n$  durum vektörü,  $\mathbf{y} \in R^m$  çıkış vektörü,  $\mathbf{u} \in R^r$  kontrol (giriş) vektörü,  $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ ,  $\mathbf{B} \in R^{n \times r}$  ve  $\mathbf{C} \in R^{m \times n}$  sabit matrislerdir. Bir sistemin kontrol edilebilirlik matrisi  $\mathbf{M}_c$  tam rank ise sistem kontrol edilebilirdir (yani  $\text{rank}(\mathbf{M}_c) = n$ , burada n durum değişkenlerinin sayısıdır).

$$\mathbf{M}_c = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}] \quad (55)$$

Kontrol vektörü  $\mathbf{u}$  aşağıdaki durum geri besleme formunda tasarlanır:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (56)$$

Burada,  $\mathbf{K} \in R^{r \times n}$  durum geri besleme kazanç matrisidir. Eş. 56'yı, Eş. 54'te yerine koyulduğunda Eş. 57 elde edilir:

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} \quad (57)$$

Kazanç matrisi  $\mathbf{K}$  aşağıdaki adımlarla elde edilir:

**Adım 1:**  $\mathbf{A}$  matrisinin karakteristik polinomdan  $a_1, a_2, \dots, a_n$  değerleri belirlenir. Bu karakteristik polinom Eş. 58'deki şekildedir:

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A}| = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n \quad (58)$$

**Adım 2:** Sistem durumu denklemini kontrol edilebilir kanonik forma dönüştüren dönüşüm matrisi  $\mathbf{T}$  belirlenir. Dönüşüm matrisi  $\mathbf{T}$  Eş. 59'dan elde edilir.

$$\mathbf{T} = \mathbf{M}_c \mathbf{W} \quad (59)$$

Burada  $\mathbf{M}_c$  matrisi Eş. 55'te verilmiştir ve  $\mathbf{W}$  aşağıdaki şekildedir.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (60)$$

**Adım 3:** Arzulanan kapalı döngü kutupları kullanılarak arzulanan karakteristik polinom elde edilir:

$$(s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n) = s^n + \alpha_1s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1}s + \alpha_n \quad (61)$$

Burada,  $\mu_1, \dots, \mu_n$  arzulanan kutupların konumudur. Eş. 61'den  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  değerleri bulunur.

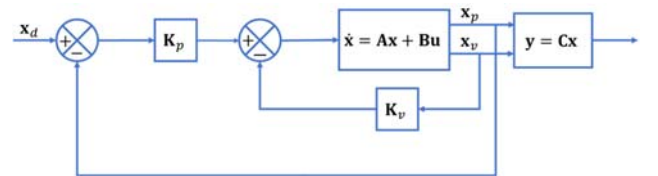
**Adım 4:** Arzulanan durum geri besleme kazanç matrisi  $\mathbf{K}$  Eş. 62'den elde edilir:

$$\mathbf{K} = [\alpha_n - a_n \quad \alpha_{n-1} - a_{n-1} \quad \dots \quad \alpha_2 - a_2 \quad \alpha_1 - a_1] \mathbf{T}^{-1} \quad (62)$$

Arzulanan konumun ( $\mathbf{x}_d$ ) takip edilebilmesi için kontrol kural girdisi

$$\mathbf{u} = -[\mathbf{K}_p \quad \mathbf{K}_v] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p - \mathbf{x}_d \\ \mathbf{x}_v \end{bmatrix} \quad (63)$$

şekindedir. Durum değişkenleri ve geri besleme kazancı sırasıyla  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_p \quad \mathbf{x}_v]^T$ ,  $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_p \quad \mathbf{K}_v]$  olarak ayrıştırılmıştır. Burada,  $\mathbf{x}_p = [x \quad y \quad \alpha \quad \psi]^T$ ,  $\mathbf{x}_v = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\alpha} \quad \dot{\psi}]^T$ 'dir.



**Şekil 4.** Kutup yerleştirme kontrol blok diyagramı (Pole placement control block diagram)

#### 3.2. LQR Kontrolü (LQR control)

Aşağıdaki şekilde doğrusal bir sistem ele alınır:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (64)$$

Burada  $\mathbf{x} \in R^n$  durum vektörü,  $\mathbf{u} \in R^r$  kontrol vektörü,  $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$  ve  $\mathbf{B} \in R^{n \times r}$  sabit matrislerdir. Burada minimize edilecek performans indeksi;

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (65)$$

Burada  $\mathbf{Q}$ , bir pozitif-tanımlı veya pozitif-yarı-sonlu reel simetrik ve  $\mathbf{R}$ , pozitif-tanımlı reel simetrik matrislerdir [25]. Performans indeksindeki  $\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$  kontrolün hızını,  $\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$  ise



kontrol çabasını ifade etmektedir. Maliyet fonksiyonunun minimize eden geri besleme kontrol kuralı;

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (66)$$

ve burada

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{x} \quad (67)$$

'dir.  $\mathbf{P}$  matrisi

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (68)$$

ifadesiyle verilen Riccati denkleminin çözümü olup simetrik ve pozitif tanımlıdır. Buradaki kontrol probleminde durum değişkenlerini sıfır denge noktasına yaklaştırmak regülatör (düzenleyici) problemini temsil eder bu yüzden bu optimizasyon problemi doğrusal karesel regülatör olarak tanımlanmaktadır. Eş. 66, Eş. 64'te yerine konulduğunda, Eş. 69 elde edilir:

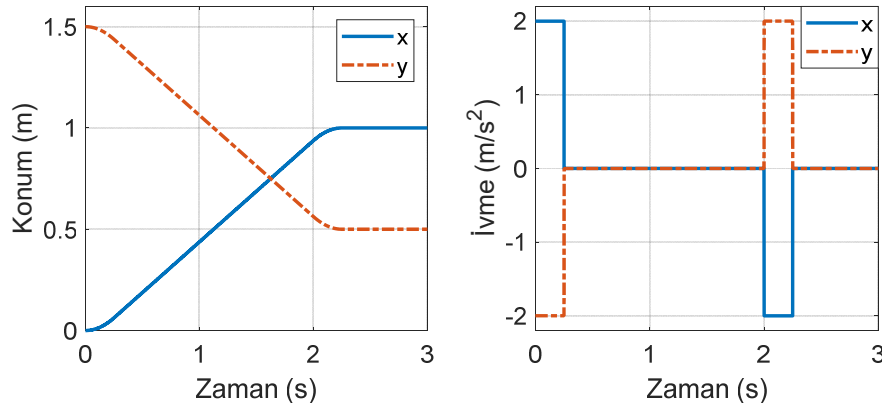
$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} \quad (69)$$

Burada  $(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})$  matrisi kararlıdır, yani  $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$  matrisinin öz değerlerinin reel kısmı negatiftir.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p - \mathbf{x}_d \\ \mathbf{x}_v \end{bmatrix} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p - \mathbf{x}_d \\ \mathbf{x}_v \end{bmatrix} \quad (70)$$

#### 4. BENZETİM (SIMULATION)

Bu bölümde, önerilen kontrol teknikleri iki robot kol yardımı ile sıvı taşınımı için uygulanmıştır. Benzetimlerde, kontrol uygulanmadan ve kontrol uygulandıktan sonraki durumlar incelenmiştir. Burada benzetimler MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıvı özellikleri [23]'den alınmış ve benzetimde kullanılan sistem parametreleri Tablo 2'de listelenmiştir. Şekil 5'te sıvının çalkalanmayan katı kütle merkezine verilen yörüngenin konum ve ivme profilleri gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi katı kütle merkezi G, (0, 1,5) konumundan (1, 0,5) konumuna 2,25 saniyede ulaşması istenmektedir.



Şekil 5. Katı kütlelerin ağırlık merkezine verilen konum-ivme profilleri  
(Position-acceleration profiles of the center of the rigid mass)

Tablo 2. Sistem parametreleri (System parameters)

Parametreler	Değer	Birim
$m_{ij}$	10	kg
$l_{ij}$	1,2	m
$I_{ij}$	2	kg.m <sup>2</sup>
$l_B$	0,5	m
$l_t$	0,3	m
$I_r$	0,0245	kg.m <sup>2</sup>
$R$	0,095	m
$m_p$	1,32	kg
$m_r$	6	kg
$c$	$3,049 \times 10^{-4}$	kg.m <sup>2</sup> /s
$l_o$	0,1261	m
$l_p$	0,052126	m
$\beta$	$\pi/20$	m
$g$	9,81	m/s <sup>2</sup>

Şekil 6 ve Şekil 7 sıvı taşınımının sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 6 sıvı kabın ağırlık merkezinin konumunu göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıvı çalkalanması yatay yönde (x-yönünde) daha etkili olduğundan dolayı sıvı kabı ulaştığı konumun etrafında sallanmaktadır. Şekil 7 sarkaç ve sıvı kabın dikey eksenle yaptığı açığı temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, x-yönünde sisteme pozitif ivme verildiğinde sıvı, ivmenin ters yönünde hareket etmekte, sabit hız aralığında ise sıvı çalkalanması gittikçe azalmakta ve negatif ivmenin etkisiyle yeniden sıvı çalkalanması artmaktadır.

Şekillerde görüldüğü gibi kontrol uygulanmadan sıvı taşınımında, kabın hızlanma veya yavaşlamasından dolayı sıvıda çalkalanma oluşmaktadır. Bu çalkalanma, kabın dikey eksen etrafında salınımına yol açmaktadır. Ayrıca sıvı çalkalanması sistemi kararsız yapan kuvvetler ve momentler oluşturarak hızlı sıvı taşınımının performansını düşürmektedir. Dolayısıyla çalkalanmadan kaynaklanan bu bozucu etkiler yok edilmelidir.

Kontrollü sıvı taşınımında, kutup yerleştirme tekniğinde sönümlenme oranı  $\zeta=1$  alınarak, arzulanan kutuplar  $\mathbf{P} = [-80 \ -60 \ -40 \ -40 \ -50 \ -50 \ -30 \ -30]^T$



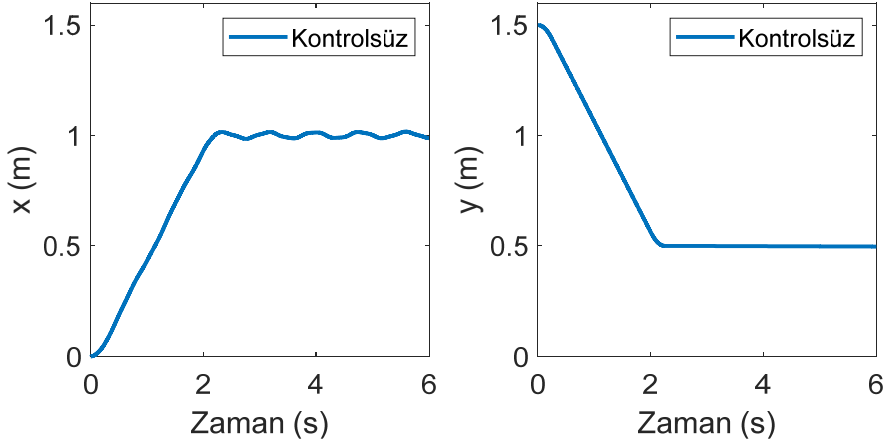
şeklinde seçilmiştir. LQR tekniğinde de  $Q = \text{diag}[5000 \ 5000 \ 500 \ 500 \ 10 \ 10 \ 5 \ 5]$  ve  $R = \text{diag}[0,001 \ 0,001 \ 0,001 \ 0,001]$  şeklinde seçilmiştir. Kontrollü sıvı taşınım benzetimlerinde her iki geri besleme tekniği birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Benzetimlerde her iki teknik, sıvı çalkalanmasını engellemede başarılı olmuştur. Dolayısıyla, çalkalanmanın bozucu etkilerini yok edilerek; sistemin kararlı bir davranış sergilenmesini sağlanmıştır. Ancak sıvı taşınımında LQR tekniği, kutup yerleştirme tekniğine göre hem sıvı kabın

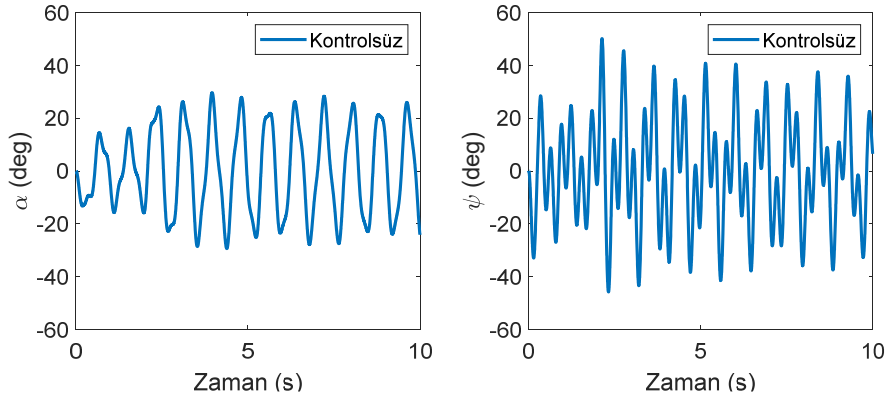
kontrolünde hem de sıvı çalkalanma kontrolünde daha yavaş performans sergilemiştir.

Şekil 8'de her iki teknik için sıvı kabın açısı ve sıvı çalkalanma sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekilde gösterildiği üzere, kutup yerleştirme tekniğinde sıvı çalkalanma seviyesi (sarkacın açısı) LQR tekniğine göre daha yüksektir. Ancak sıvı kap açısında tam tersi bir durum oluşmaktadır.

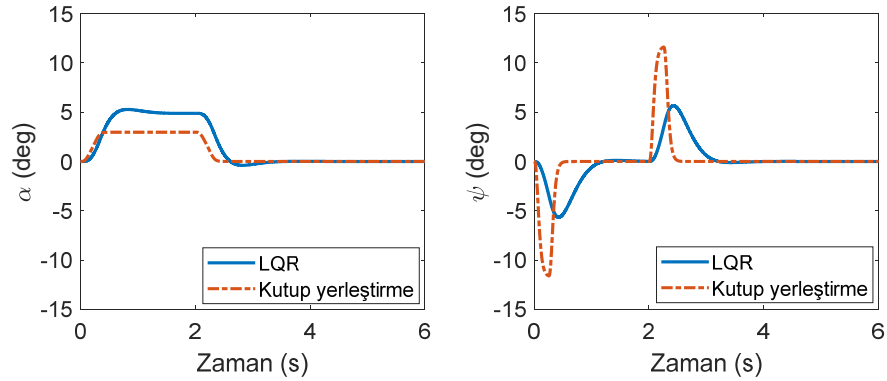
Kabın ağırlık merkezinin konumuna ilişkin, her iki teknik için benzetim sonuçları Şekil 9'da yer almaktadır. LQR



Şekil 6. Sıvı kabın konumu (Position of the container)



Şekil 7. Sıvı kap ve sarkacın açısı (Angle of the container and pendulum)



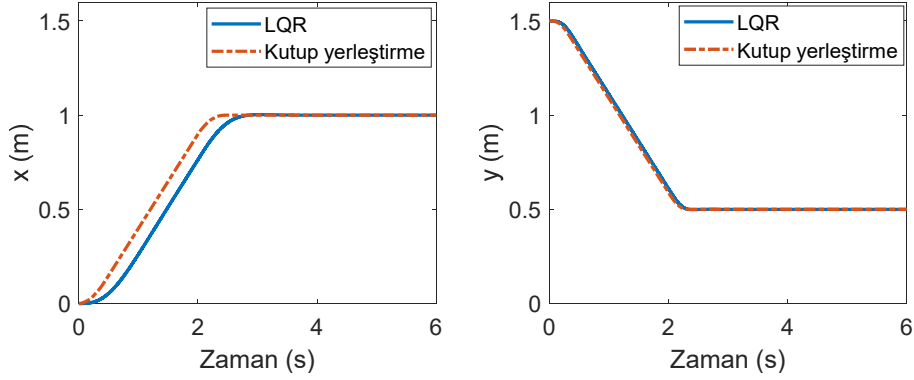
Şekil 8. Sıvı kap ve sarkacın açısı (Angle of the container and pendulum)

teknğinde, kabın ağırlık merkezi x-yönünde kutup yerleştirme tekniğine göre daha yavaş kontrol edilmektedir. Ancak, y-yönünde her iki teknikte birbirine göre yaklaşık bir performans sergilemektedir.

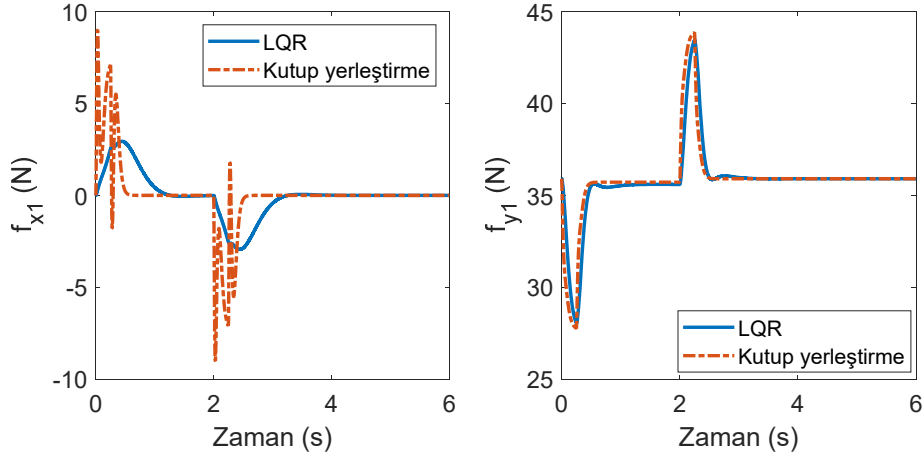
Şekil 10 ve Şekil 11 robot kolları tarafından silindirik kaba uygulan kuvvetleri göstermektedir. Bu kuvvetler, kutup yerleştirme ve LQR teknikleri vasıtasıyla kaba

uygulanmaktadır. Şekillerden görüldüğü gibi, kutup yerleştirme tekniğinde denetimci performansı LQR tekniğine göre daha iyidir. Dolayısıyla, kutup yerleştirme tekniğinde daha fazla enerji harcanmaktadır.

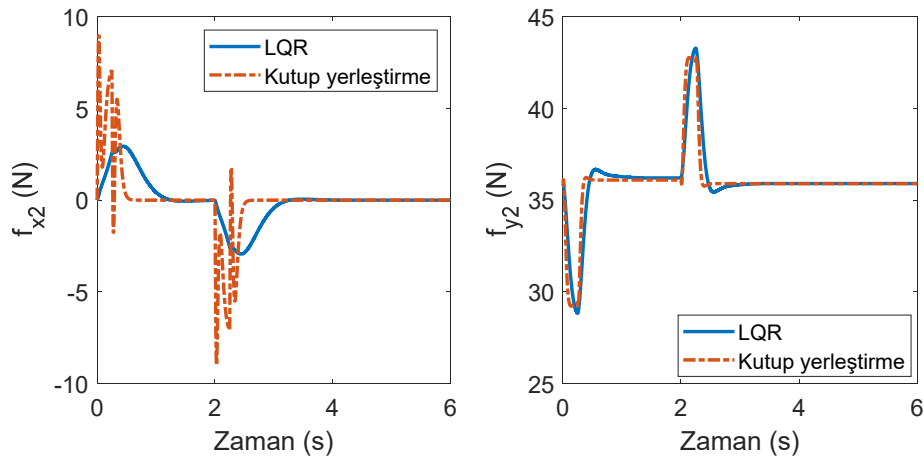
Şekil 12 ve Şekil 13'te her iki teknik tarafından sıvı kaba uygulanan kuvvetlerin, robot kolların eklem torklarındaki etkileri gösterilmektedir.



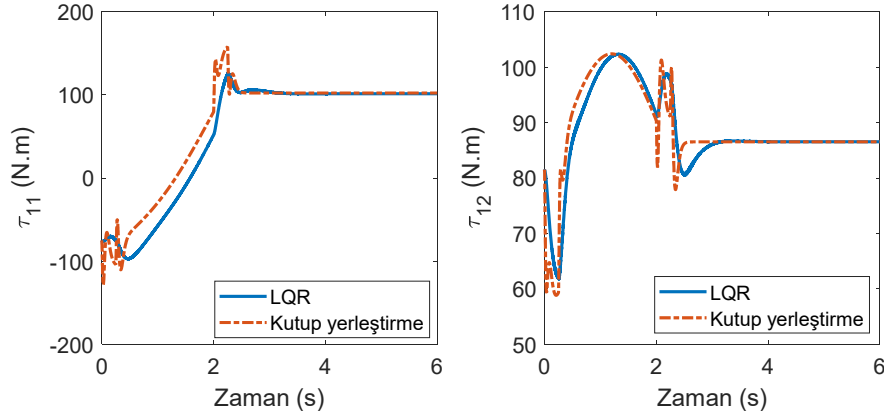
Şekil 9. Katı kütleli ağırlık merkezinin konumu (Position of the center of the rigid mass)



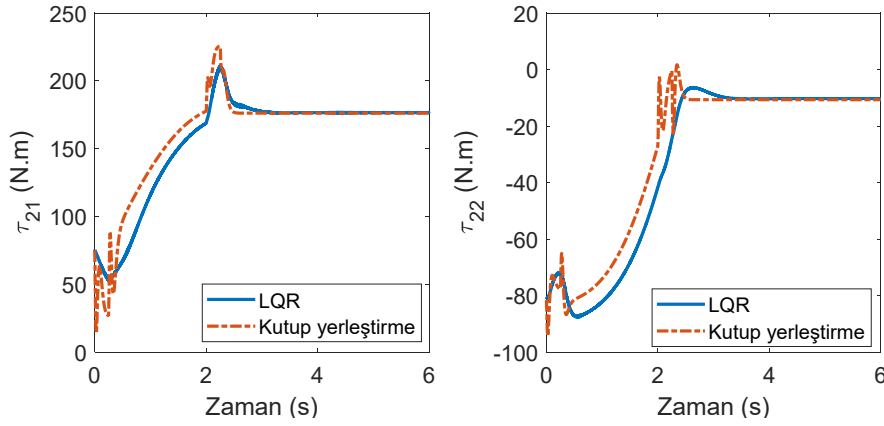
Şekil 10. Birinci robot kolundan sıvı kabına uygulanan kuvvetler (Applied forces to the container by first robot)



Şekil 11. İkinci robot kolundan sıvı kabına uygulanan kuvvetler (Applied forces to the container by second robot)



Şekil 12. Birinci robotun eklem torkları (Joint torques of first robot)



Şekil 13. İkinci robotun eklem torkları (Joint torques of second robot)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede doğrusal olmayan sıvı çalkalanma dinamiği doğrusallaştırılarak, kutup yerleştirme ve LQR teknikleri ile sıvı dolu bir silindirik kabın çalkalanmadan ve dökülmeden taşınması iki robot kolu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu robot kolları silindirik kabı beraber tuttuğunda kapalı kinematik zincir ve robot kolların hareketinde bazı kısıtlamaların oluşmasına yol açmıştır. Dolayısıyla, robot kolların konum, hız ve ivme değerleri, bir dizi kısıt denklemleri ile elde edilerek robottaki eklem torklar hesaplanmıştır.

Benzetim sonuçlarından görülebileceği üzere, her iki teknik sıvının çalkalanmadan taşınmada başarılı olmuş ve sıvı çalkalanmasını engelleyerek sıvı ve sıvı kabını bir katı nesne olarak hareket etmesini sağlamıştır. İki teknikte de (LQR ve Kutup Yerleştirme) taşıma esnasında hatalar oluşmuş ancak kalıcı durum hatası gözükmemiştir.

İki teknik birbiri ile karşılaştırıldığında birbirlerine göre bazı avantajlara ve dezavantajlara sahip oldukları gözlemlenmiştir. Sıvı çalkalanmasının engellenmesinde LQR tekniği, kutup yerleştirme tekniğine göre daha başarılı olurken; kutup yerleştirme tekniği, LQR tekniğinden daha kısa bir sürede sistemi kontrol etmeyi başarmıştır. Kap açısı konusunda ise; kutup yerleştirme, LQR'dan hem süre olarak

hem de kap açısı büyüklüğünde daha iyi performans sergilemiştir. Her iki teknik kabın y-yönündeki konumunda yaklaşık bir sonuç gösterirken, x-yönünde kutup yerleştirme tekniği sıvı kabı, LQR'dan daha hızlı şekilde istenilen konumuna vardırılmıştır. Denetimci çabası kutup yerleştirmede daha yüksek olduğundan, LQR tekniğinden daha fazla enerji harcamasına sebep olmuştur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Reyhanoglu, M. and Hervas, J.R., Nonlinear modeling and control of slosh in liquid container transfer via a PPR robot, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18 (6), 1481-1490, 2013.
2. Kurode, S., Spurgeon, S.K., Bandyopadhyay, B. and Gandhi, P., Sliding mode control for slosh-free motion using a nonlinear sliding surface, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 (2), 714-724, 2012.
3. Aribowo, W., Yamashita, T., Terashima, K. and Kitagawa, H. Input shaping control to suppress sloshing on liquid container transfer using multi-joint robot arm, *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei-Taiwan, 3489-3494, 2010.
4. Smith, C., Karayiannidis, Y., Nalpantidis, L., Gratal, X., Qi, P., Dimarogonas, D.V. and Kragic, D., Dual arm manipulation—A survey, *Robotics and Autonomous systems*, 60 (10), 1340-1353, 2012.

5. Basile, F., Caccavale, F., Chiacchio, P., Coppola, J. and Marino, A., A decentralized kinematic control architecture for collaborative and cooperative multi-arm systems, *Mechatronics*, 23 (8), 1100-1112, 2013.
6. Ren, Y., Liu, Y., Jin, M. and Liu, H., Biomimetic object impedance control for dual-arm cooperative 7-DOF manipulators, *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 273-287, 2016.
7. Caccavale, F., Chiacchio, P., Marino, A. and Villani, L., Six-dof impedance control of dual-arm cooperative manipulators, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 13 (5), 576-586, 2008.
8. Liu, T., Lei, Y., Han, L., Xu, W. and Zou, H., Coordinated resolved motion control of dual-arm manipulators with closed chain, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13 (3), 80, 2016.
9. Jung, J., Yoon, H., Lee, C. and Shin, S., Effect of the vertical baffle height on the liquid sloshing in a three-dimensional rectangular tank, *Ocean Engineering*, 44, 79-89, 2012.
10. Kolaie, A., Rakheja, S. and Richard, M.J., A coupled multimodal and boundary-element method for analysis of anti-slosh effectiveness of partial baffles in a partly-filled container, *Computers & Fluids*, 107, 43-58, 2015.
11. Panigrahy, P., Saha, U. and Maity, D., Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks, *Ocean Engineering*, 36 (3-4), 213-222, 2009.
12. Goudarzi, M. and Farshadmanesh, P., Numerical evaluation of hydrodynamic damping due to the upper mounted baffles in real scale tanks, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, 290-298, 2015.
13. Yano, K.i. and Terashima, K., Robust liquid container transfer control for complete sloshing suppression, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 9 (3), 483-493, 2001.
14. Tzamtzi, M.P., Koumboulis, F.N. and Kouvakas, N.D. A two stage robot control for liquid transfer, 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 1324-1333, 2007.
15. Reyhanoglu, M. and Hervas, J.R., Nonlinear dynamics and control of space vehicles with multiple fuel slosh modes, *Control Engineering Practice*, 20 (9), 912-918, 2012.
16. Dodge, F.T., The new dynamic behavior of liquids in moving containers, Southwest Research Inst. , San Antonio, TX, 2000.
17. Kim, D.H. and Choi, J.W. Attitude controller design for a launch vehicle with fuel-slosh, SICE 2000. Proceedings of the 39th SICE Annual Conference, Iizuka-Japan, 235-240, 2000.
18. Yano, K.i., Higashikawa, S. and Terashima, K., Motion control of liquid container considering an inclined transfer path, *Control Engineering Practice*, 10 (4), 465-472, 2002.
19. Terashima, K. and Yano, K.i., Sloshing analysis and suppression control of tilting-type automatic pouring machine, *Control Engineering Practice*, 9 (6), 607-620, 2001.
20. Thakar, P.S., Bandyopadhyay, B., Gandhi, P. and Kurode, S. Robust control of rotary slosh using integral sliding modes, 2012 12th International Workshop on Variable Structure Systems, Mumbai-India, 440-445, 2012.
21. Kurode, S., Trivedi, P., Bandyopadhyay, B. and Gandhi, P. Second order sliding mode control for a class of underactuated systems, 2012 12th International Workshop on Variable Structure Systems, 458-462, 2012.
22. Thakar, P.S., Bandyopadhyay, B. and Gandhi, P. Sliding mode control for a class of underactuated systems using feedforward normal form: A slosh-container system, 2014 13th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS), Nantes-France, 1-6, 2014.
23. Bandyopadhyay, B., Gandhi, P. and Kurode, S., Sliding mode observer based sliding mode controller for slosh-free motion through PID scheme, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56 (9), 3432-3442, 2009.
24. Aribowo, W., Yamashita, T. and Terashima, K., Integrated trajectory planning and sloshing suppression for three-dimensional motion of liquid container transfer robot arm, *Journal of Robotics*, 2015, 3, 2015.
25. Ogata, K., *Modern control engineering*, Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2009.
26. Dorf, R.C. and Bishop, R.H., *Modern control systems*, Pearson, New York, USA, 2016.
27. Chan, R.P.M., Stol, K.A. and Halkyard, C.R., Review of modelling and control of two-wheeled robots, *Annual reviews in control*, 37 (1), 89-103, 2013.
28. Feng, T., Liu, T., Wang, X., Xu, Z., Zhang, M. and Han, S.-c. Modeling and implementation of two-wheel self-balancing robot equipped with supporting arms, 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Beijing-China, 713-718, 2011.
29. Shehu, M., Ahmad, M.R., Shehu, A. and Alhassan, A. LQR, double-PID and pole placement stabilization and tracking control of single link inverted pendulum, 2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), George Town-Malaysia, 218-223, 2015.
30. Nath, V. and Mitra, R. Swing-up and control of Rotary Inverted Pendulum using pole placement with integrator, 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences Chandigarh-India, 1-5, 2014.
31. Zubov, N., Mikrin, E., Misrikhanov, M.S., Ryabchenko, V. and Timakov, S., The use of the exact pole placement algorithm for the control of spacecraft motion, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 52 (1), 129-144, 2013.
32. Wahab, A.A., Mamat, R. and Shamsudin, S.S., The effectiveness of pole placement method in control system design for an autonomous helicopter model in hovering flight, *International Journal of Integrated Engineering*, 1 (3), 2009.
33. de Souza, L.C.G. and de Souza, A.G., Satellite attitude control system design considering the fuel slosh dynamics, *Shock and Vibration*, 2014, 2014.

34. Sever, M., Sendur, H.S., Yazici, H. and Arslan, M.S., Active vibration control of a vehicle suspension system having biodynamic driver model with state derivative feedback LQR, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 34 (3), 1574-1583, 2019.
35. Kumar, E.V. and Jerome, J., Robust LQR controller design for stabilizing and trajectory tracking of inverted pendulum, *Procedia Engineering*, 64, 169-178, 2013.
36. Prasad, L.B., Tyagi, B. and Gupta, H.O., Optimal control of nonlinear inverted pendulum system using PID controller and LQR: performance analysis without and with disturbance input, *International Journal of Automation and Computing*, 11 (6), 661-670, 2014.
37. Argentim, L.M., Rezende, W.C., Santos, P.E. and Aguiar, R.A. PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform, 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), Dhaka-Bangladesh, 1-6, 2013.
38. Zhang, T. and Yang, J., Nonlinear dynamics and robust control of sloshing in a tank, *Journal of Vibration and Control*, 25 (1), 132-140, 2019.
39. Dafeng, S., Chuqi, S., Xiaohua, Z. and Nannan, Y., LQR Based Battery Charge Sustaining Strategy for Hybrid Electric Vehicle, *IFAC-PapersOnLine*, 51 (31), 601-605, 2018.
40. Adli, M.A., Ito, K. and Hanafusa, H. Controlling the contact compliance via internal forces on objects held by dual-arm robots, *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh-USA, 62-69, 1995.
41. Baruh, H., *Applied dynamics*, CRC press, New York, A.B.D., 2014.

