ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, Bursa, 24-26 Kasım 2022

Hesaplanmış Tork Kontrolü Yöntemi ile RRR Tipi Robot Manipülatörünün Yörünge Kontrolü

Trajectory Tracking Control of RRR Type Robot Manipulator with Computed Torque Control Method

Ammar Urgan[1], Janset Daşdemir[1]

[1]Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi
ammar@yildiz.edu.tr, janset@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışma, RRR tipinde bir robot manipülatörünün (Geomagic Touch Phantom Omni) bilgisayar ortamında üretilen referans sinyalini takip etmesini sağlayan kontrolör yapısının tasarımını içermektedir. Uygulanan kontrol mekanizması hesaplanmış tork kontrol yöntemi olarak bilinen doğrusal olmayan bir kontrol yapısıdır. Çalışmanın deneysel kısmında veriler veri aktarım ünitesi kullanılmadan, PhanTorque kütüphanesi yardımıyla MATLAB/Simulink ortamına gerçek zamanlı olarak aktarılmıştır. Yapılan analiz sonucunda sistem hata dinamiğinin asimptotik kararlı olduğu ve kapalı çevrim sistemi içerisindeki tüm sinyallerin sınırlı olduğu gösterilmiştir. Tasarlanan kontrolör yapısı ötelenmiş sinüs dalgası seklindeki yüksek ve düşük frekanslı referans sinyalleri ile test edilmiştir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği ve performansı benzetim çalışmaları ve deneysel sonuçlar ile desteklenmiştir.

Abstract

In this study, we present the design method of the controller structure that enables an RRR type robot manipulator (Geomagic Touch Phantom Omni) to follow the reference signal generated in the computer environment. The applied control mechanism is a non-linear control structure known as the computed torque control method. In the experimental part of the study, the data were transferred to the MATLAB/Simulink environment in real time with the help of the PhanTorque library, without using data acquisition unit. The analyzes show that the error system dynamics is asymptotically stable and all signals in the closed loop system are bounded. The proposed control structure has been tested with high and low frequency reference signals in the form of shifted sine waves. The feasibility and the performance of the proposed method has been shown by simulation and experimental studies.

1. Giriş

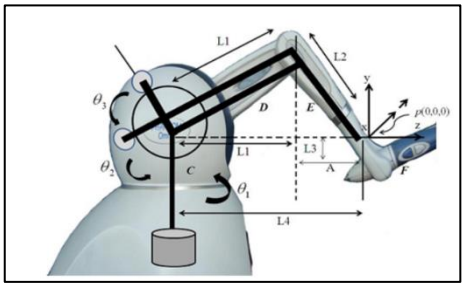
Robot manipülatörleri, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan, doğrusal olmayan bileşenler içeren ve dinamiği zamanla değişebilen sistemlerdir [1]. Manipülatörün dinamik modeli, tipik çalışma döngüsü için gerekli olan kuvvet ve tork hesaplamalarında, aktüatör ve kontrol döngülerinin tasarımında önem arz etmektedir. Özellikle model tabanlı kontrol yapılarının tasarımı ve benzetim çalışmaları için gereklidir [2]. Model bilgisine ulaşılamadığı ya da kısmen bilindiği durumlarda yapay sinir ağı ve bulanık mantık tabanlı metotlar sistem kestirimi için kullanılmıştır [3]. Kostic ve ekibi tarafından yapılan çalışmada Euler-Lagrange metoduyla sistem modellenmiş ve PD (Oransal-Türevsel) kontrolcü ile eklemlerin kontrolü sağlanmıştır [4]. Sansanayuth ve ekibi ise; modelden bağımsız PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolcü ile model bilgisinden yararlanılarak tasarlanmış ters dinamik kontrol metodunu karşılaştırmıştır [5].

Hesaplanmış Tork Kontrol metodu robot manipülatör sistemleri için etkili bir kontrol stratejisi olup doğrusal olmayan sistemler için geliştirilen geribesleme doğrusallaştırması metodunun özel bir uygulaması olarak düşünülebilir. Söz konusu metot manipülatör yapısının tam bilinen dinamik modelini kullanarak robot dinamiğinin doğrusallaştırılmasına ve böylelikle her bir eklem hareketinin bilinen doğrusal kontrol stratejileri yardımıyla ayrı ayrı kontrol edilebilmesine olanak sağlar [6]. Yapılan çalışmalarda Hesaplanmış Tork Kontrolü metodunun 2 eksenli [7] ve 4 eksenli [8] robotların yörünge takip probleminde başarılı olduğu benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

Bu çalışmada, Geomagic-Touch (Phantom Omni) haptik cihazına ait eklemlerin yörünge kontrolü, hesaplanmış tork kontrolü yöntemi ile sağlanmıştır. Aldana ve ekibi tarafından geliştirilmiş olan PhanTorque kütüphanesi kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında gerçeklenmiştir[9].

2. Robot Kolu Dinamiği

Phantom Omni robotuna ait eklem yerleşimi ve denklemlerde kullanılan değişkenler Şekil-1'de görülmektedir.



Şekil 1 Phantom Omni cihazının kinematiği [10]

Phantom Omni robotunun dinamik modeli Euler-Lagrange yöntemiyle:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta) = \tau \quad (1)$$

formunda ifade edilebilir [11]. Burada $M = M^T \in \mathbb{R}^{3x3}$ pozitif tanımlı, simetrik atalet matrisini, $V \in \mathbb{R}^{3x3}$ merkezcil-Coriolis kuvvetler matrisini, $N \in \mathbb{R}^{3x1}$ ise eklemlere etkiyen yerçekimi ve diğer kuvvetleri temsil etmektedir. $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \in \mathbb{R}^{3x1}$ eklemlere ait açısal pozisyon, $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in \mathbb{R}^{3x1}$ sisteme uygulana tork denetim girişi vektörlerdir.

Atalet matrisi:

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

seklinde tanımlanmış olup ilgili elemanlar aşağıda tanımlanmıştır:

$m_{1,1} = k_1 + k_2\cos(2\theta_2) + k_3\cos(2\theta_3) + k_4\cos(\theta_2)\sin(\theta_3)$

$m_{1,2} = k_5\sin(\theta_2)$

$m_{1,3} = 0$

$m_{2,1} = k_5\sin(\theta_2)$

$m_{2,2} = k_6$

$m_{2,3} = -0.5k_4\sin(\theta_2 - \theta_3)$

$m_{3,1} = 0$

$m_{3,2} = -0.5k_4\sin(\theta_2 - \theta_3)$

$m_{3,3} = k_7$

Merkezcil-Coriolis kuvvetler matrisi ise

$$V = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & v_{1,3} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & v_{3,3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

formunda olup matris elemanları aşağıdaki gibidir:

$v_{1,1} = -k_2\dot{\theta}_2\sin(2\theta_2) - k_3\dot{\theta}_3\sin(2\theta_3) - 0.5k_4\dot{\theta}_2\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) + 0.5k_4\dot{\theta}_3\cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$

$v_{1,2} = -k_2\dot{\theta}_1\sin(2\theta_2) - k_5\dot{\theta}_2\cos(\theta_2) - 0.5k_4\dot{\theta}_1\sin(\theta_2)\sin(\theta_3)$

$v_{1,3} = -k_3\dot{\theta}_1\sin(2\theta_3) + 0.5k_4\dot{\theta}_1\cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$

$v_{2,1} = k_2\dot{\theta}_1\sin(2\theta_2) + 0.5k_4\dot{\theta}_1\sin(\theta_2)\sin(\theta_3)$

$v_{2,2} = 0$

$v_{2,3} = 0.5k_4\dot{\theta}_3\cos(\theta_2 - \theta_3)$

$v_{3,1} = k_3\dot{\theta}_1\sin(2\theta_3) + 0.5k_4\dot{\theta}_1\cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$

$v_{3,2} = -0.5k_4\dot{\theta}_2\cos(\theta_2 - \theta_3)$

$v_{3,3} = 0$

Yerçekimi etkisi ise:

$$N = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

olarak ile ifade edilen ve elemanları:

$n_1 = 0$

$n_2 = k_8\cos(\theta_2) + k_{10}(\theta_2 - 0.5\pi)$

$n_3 = k_9\sin(\theta_3)$

seklinde tanımlanan vektördür. Denklemlerde kullanılan sabitler ise aşağıdaki gibidir [11]:

$k_1 = 1.798x10^{-3}$

$k_2 = 0.864x10^{-3}$

$k_3 = 0.486x10^{-3}$

$k_4 = 2.766x10^{-3}$

$k_5 = 0.308x10^{-3}$

$k_6 = 2.526x10^{-3}$

$k_7 = 0.652x10^{-3}$

$k_8 = 164.158x10^{-3}$

$k_9 = 94.050x10^{-3}$

$k_{10} = 117.294x10^{-3}$.

3. Kontrolör Tasarımı

Sistemdeki hata sinyalleri ve türevleri 5,6 ve 7 numaralı denklemlerdeki şekilde oluşturulmuştur.

$$e = \theta_d - \theta \quad (5)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \quad (7)$$

1 numaralı denklem $\ddot{\theta}$ için düzenlenirse

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta)\left(\tau - V(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} - N(\theta)\right) \quad (8)$$

elde edilir. Buna göre hesaplanmış tork kontrol giriş sinyali

$$\tau = M(\theta)u + V(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta) \quad (9)$$

şeklindedir. Yardımcı kontrol sinyali

$$u = \ddot{\theta}_d + K_d\dot{e} + K_p e \quad (10)$$

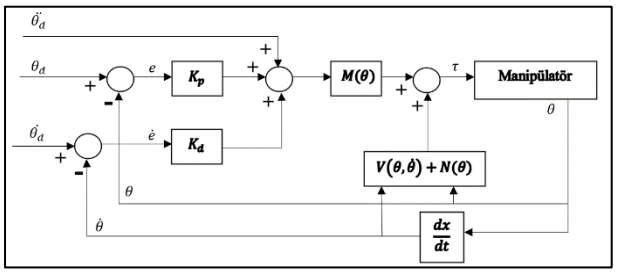
olarak tanımlanırsa sisteme uygulanan tork kontrol giriş sinyali

$$\tau = M(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_d\dot{e} + K_p e) + V(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta) \quad (11)$$

formunda elde edilir. 11 numaralı eşitlikte ifade edilen tork kontrol sinyali 1 numaralı denklemde yerine yazılırsa

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = 0 \quad (12)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Lineer sistem teorisinden bilindiği üzere ($K_p > 0, K_d > 0$) hata dinamiğinin asimptotik kararlı olduğu, buna göre hata sinyalinin sıfıra yakınsayacağı garanti edilir. Böylelikle yörünge takip problemi çözülmüş olur. Kontrolcü katsayıları kritik sönümlü ($\zeta = 1$) olacak şekilde ayarlanmıştır. Kontrolcünün uygulanması sırasında bu denklemdeki θ açısal konum değerleri, sistemden okunan değerlerdir. $\dot{\theta}$ açısal hız değerleri ise sistemden okunan açısal konumların türevi hesaplanarak bulunduğu için direkt olarak kullanılmamış, sinyal filtrelenmiştir. Kontrol şeması Şekil 2'de görülebilmektedir.



Şekil 2 Hesaplanmış Tork Kontrolü Şeması

4. Benzetim ve Deney Çalışmaları

Referans sinyali olarak birbirleri ile arasında 10 katlık frekans farkı olan sinyaller seçilmiştir. Hareket uzayı içerisinde bir referans sinyali uygulayabilmek için manipülatör, sıfır tork altında serbestçe hareket ettirilmiş ve eksenlerden okunan değerlere bakılmıştır. Birinci eksende orta noktada sıfır değeri okunduğu için direkt olarak bir sinüs sinyali uygulanmıştır. İkinci ve üçüncü eksende ise hareket uzayında okunan minimum değerler sıfır olduğu için ötelenmiş bir sinüs sinyali uygulanmıştır.

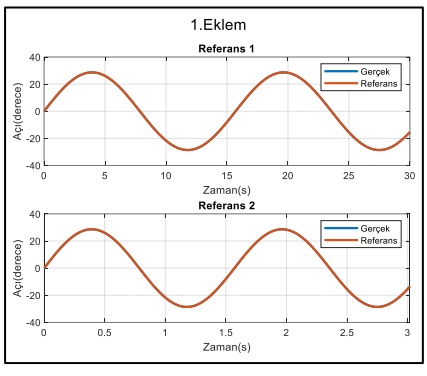
$$\theta_{d1} = \begin{bmatrix} 0.5\sin(0.4t) \\ 0.75 + 0.25\sin(0.25t) \\ 0.7 + 0.3\sin\left(0.2t + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\theta_{d2} = \begin{bmatrix} 0.5\sin(4t) \\ 0.75 + 0.25\sin(2.5t) \\ 0.7 + 0.3\sin\left(2t + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (14)$$

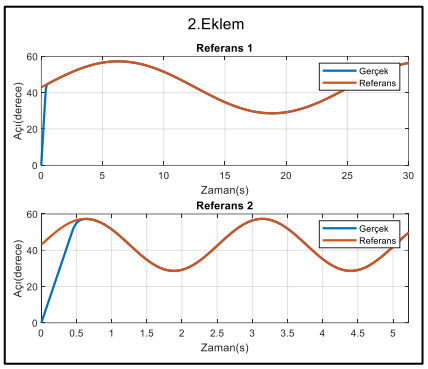
Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar aşağıda yer almaktadır.

4.1. Benzetim Sonuçları

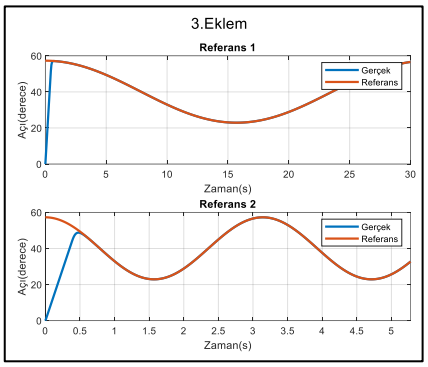
Yapılan deneyler sonucunda sisteme uygulanan referans sinyallerine göre eklemlerin hareketleri Şekil 3-5'te verilmiştir. Aynı şekilde robota uygulanan tork kontrol sinyalleri de şekil 6-8'de verilmiştir. Referans takibi sırasında tüm eksenlerdeki hatalar her iki referans sinyali için de sıfıra yakınsamaktadır.



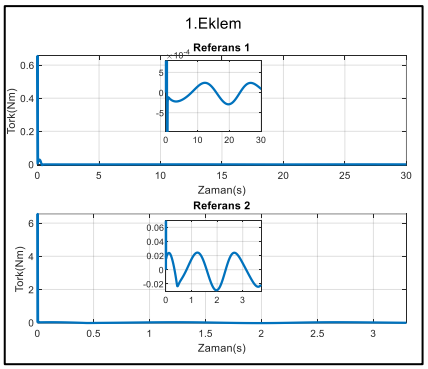
Şekil 3 1.Eklemin hareketi (Benzetim)



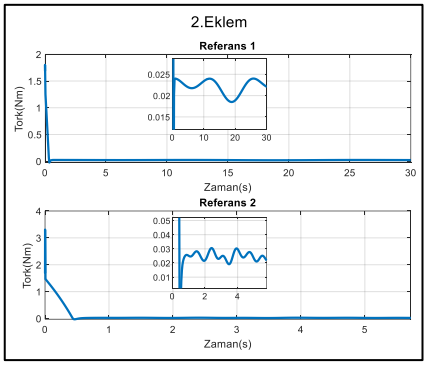
Şekil 4 2.Eklemin hareketi (Benzetim)



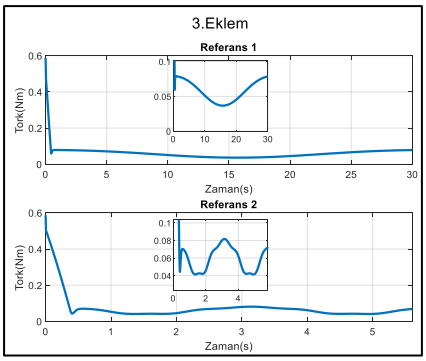
Şekil 5 3.Eklemin hareketi (Benzetim)



Şekil 6 1.Ekleme uygulanan tork (Benzetim)



Şekil 7 2.Ekleme uygulanan tork (Benzetim)

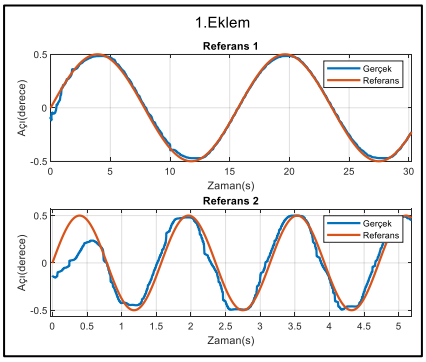


Şekil 8 3.Ekleme uygulanan tork (Benzetim)

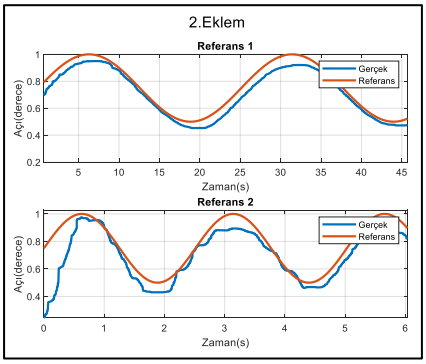
4.2. Deney Sonuçları

Deneyin gerçekleştirilmesi sırasında haberleşme hızı olarak 1kHz seçilmiştir. MATLAB/Simulink platformunda kullanılan PhanTorque kütüphanesi ile haberleşme sağlanmıştır [9]. Simulink ile robot arasındaki bağlantıyı sağlayan bu platform bir donanım gibi davranmadığı için gerçek zaman ile benzetim zamanı eşleşmemektedir. Bu sorunun çözümü için benzetim çalışması boyunca yapılan hesaplamalardan sonra 1ms olan örnekleme zamanının dolması beklenmekte ve 1ms'lik süre geçtikten sonra bir sonraki adıma geçilmektedir.

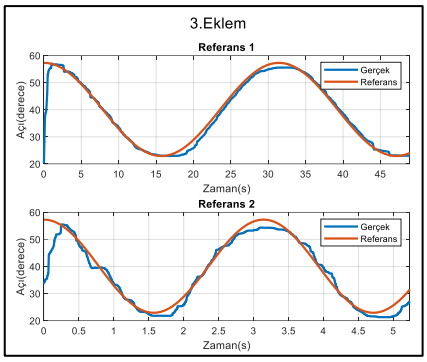
Yapılan deneyler sonucunda sisteme uygulanan referans sinyallerine göre eklemlerin hareketleri Şekil 9-11'de verilmiştir. Aynı şekilde robota uygulanan tork kontrol sinyalleri de Şekil 12-14'te verilmiştir.



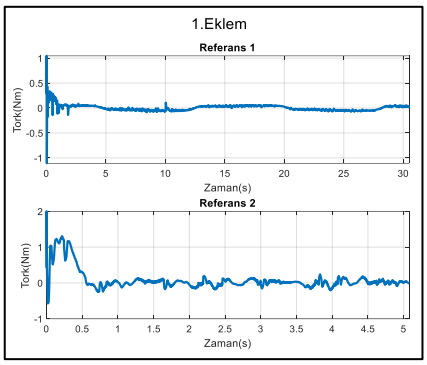
Şekil 9 1.Eklemin hareketi (Deney)



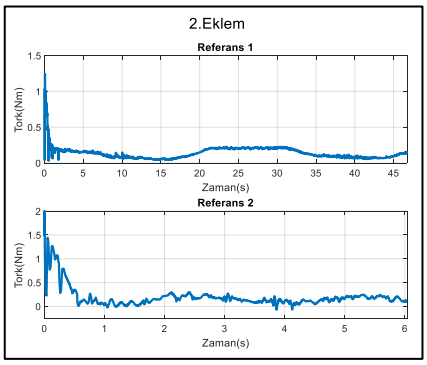
Şekil 10 2.Eklemin hareketi (Deney)



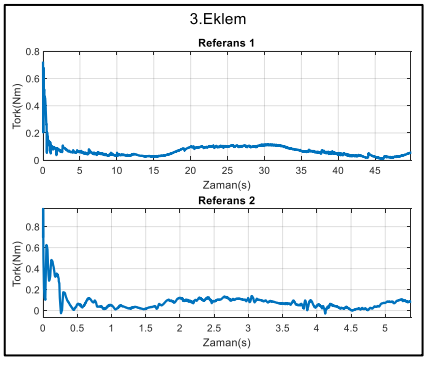
Şekil 11 3.Eklemin hareketi (Deney)



Şekil 12 1.Ekleme uygulanan tork (Deney)



Şekil 13 2.Ekleme uygulanan tork (Deney)



Şekil 14 3.Ekleme uygulanan tork (Deney)

5. Sonuçlar

Benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar gerek yüksek gerekse düşük frekanslı referans sinyallerinin, uygulanabilir büyüklükteki bir kontrol sinyali ile takip edilebildiğini göstermektedir. Deneysel sistemde ise hızlı bir referans sinyalinin hassasiyette bir miktar bozulmaya yol açtığı gözlenmiştir.

Çalışmadaki sırasında veri iletim kartı kullanılmadığı için tam anlamıyla gerçek zamanlı bir haberleşme mümkün olmamıştır. Direkt olarak bilgisayarın işlemcisi üzerinde çalışan bu modelde işlemci kaynaklı gecikmeler yaşanabilmektedir. Gerçek zamana yaklaşmak adına 4.2 başlığında açıklanan yöntemle çalışma süresi boyunca 1ms'lik örnekleme zamanına %95'e yakın oranda uyulmuştur.

Phantom Omni cihazı bilindiği üzere genellikle haptik uygulamalar için geliştirilmiştir. Gelecekte bu özellikten yararlanılarak referans yörüngenin benzer yapıdaki bir haptik cihaz ile üretildiği teleoperasyon tabanlı çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

6. Kaynaklar

[1] Vukobratovic, M., Potkonjak, V., Dynamics of Manipulation Robots: Theory and Application. Springer-Verlag, 1982.

[2] Sciavicco, L., Siciliano, B., Modelling and control of robot manipulators. Springer Science & Business Media, 2001.

[3] Efe O.M., Kaynak O., "A comparative study of neural network structures in identification of nonlinear systems", Mecathronics, Cilt 9, sn.287-300,1999.

[4] Kostic D., Hensen R., de Jager B., Steinbuch M., "Closed-form kinematic and dynamic models of an industrial-like RRR robot." Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292). Cilt 2, sn.1309-1314, 2002.

[5] Sansanayuth, T., Nilkhamhang, I., & Tungpimolrat, K., "Teleoperation with inverse dynamics control for phantom omni haptic device." 2012 Proceedings of SICE Annual Conference sn. 2121-2126, 2012.

[6] Fu K., Gonzalez R., Lee C., "Robotics: Control, sensing, vision and intelligence", McGraw–Hill, 1987.

[7] Sharkawy, A. N., Koustoumpardis, P., Dynamics and computed-torque control of a 2-DOF manipulator: Mathematical analysis. International Journal of Advanced Science and Technology, 28(12), sn.201-212. 2019.

[8] Nguyen, T. Q., Phan, V. T., Vo, D. T., Trinh, V. H., Nguyen, H. V., Tran, M. S., & Tran, D. T., Kinematics, Dynamics and Control Design for a 4-DOF Robotic Manipulator. In 2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE) , sn. 138-144, IEEE, 2021.

[9] Aldana C. I., Nuño E., Basañez L., and Romero E., "Operational Space Consensus of Multiple Heterogeneous Robots without Velocity Measurements", Journal of the Franklin Institute. 351(3), sn.1517–1539, 2014.

[10] Silva A.J., Ramirez O.A.D., Vega V.P., Oliver J.P.O., "PHANToM Omni Haptic Device: Kinematic and Manipulability", *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, CERMA*, sn.193-198, 2009.

[11] Nygaard A., "High-Level Control System for Remote Controlled Surgical Robots Haptic Guidance of Surgical Robot, *Master of Science thesis in Engineering Cybernetics*, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2008.