IMPLEMENTASI FUZZY-PD UNTUK MENENTUKAN POSISI OBYEK PADA MODEL SIMULASI ROBOT *ARM MANIPULATOR* 3 DOF (*DEGREE OF FREEDOM*)DALAM BIDANG 2 DIMENSI

Wahyu Setyo Pambudi [1], Nona Mahditiara Aryuni Sumanang [2]

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Internasional Batam [1), 2)]
Jalan Gajahmada Baloi Sei Ladi Batam 29442
Email: pambudi@uib.ac.id [1)], yoe2fa@yahoo.com [1)], nona@uib.ac.id [2)]

ABSTRAK

Penelitian robot *Arm Manipulator* difokuskan pada sistem kontrol. Kontrol fuzzy-PD dapat digunakan untuk mengontrol robot yang memiliki sudut kesalahan minimal. Penerapan robot *arm manipulator* banyak ditemukan di industri, termasuk juga digunakan di daerah yang berbahaya serta tidak memungkinkan dijangkau manusia. Definisi tentang Robot *arm manipulator* adalah sebuah mekanisme pergerakan yang tersusun dari beberapa bagian secara seri yang terhubung dengan sebuah poros yang bergerak melingkar maupun bergeser yang memiliki derajat kebebasan DOF (*Degree of Freedom*). Pergerakan robot ini terkait dengan *inverse* dan *forward kinematic*, serta *dynamic* robot. Pada proses realisasi pembuatan robot *arm manipulator* ini memerlukan model simulasi untuk analisisnya, sehingga dapat menghindari kesalahan yang mengakibatkan kerugian. Berdasarkan hal ini maka perlu dilakukan penelitian awal melalui pembuatan simulasi robot *arm manipulator* serta analisisnya sebelum dilakukan realisasi. Harapannya adalah dengan adanya program simulasi robot *arm manipulator* dapat menjadi dasar untuk menentukan parameter-parameter yang diperlukan pada proses realisasinya nanti. Pada penelitian ini didapatkan hasil sudut untuk mencapai titik target yang diinginkan meskipun memiliki *error* dibawah 2%, *trajectory* memiliki simpangan rata-rata sebesar 18%. Setiap perubahan massa *link 1* dan *link 2* akan mempengaruhi hasil $\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$.

Kata Kunci: Fuzzy-PD, DOF, *Inverse* dan *Forward kinematic*, *Dynamic*.

ABSTRACT

Research about arm manipulator robot is focused on the control system. Fuzzy-PID control can be used controlling robot that has error minimum angle. A many arm manipulator robot applications are found in factory, including use in hazardous areas and out of reach from a human. The definition of arm manipulator robot is a movement mechanism that is composed of several link connected in series with a circular shaft that moves and shifts that have degrees of freedom DOF (Degree of Freedom).The movement of this robot including inverse and forward kinematic and dynamic robot. In the process of making the realization of robotic arm manipulators require simulation models for analysis, to avoid the error that lead to losses. Based on this initial research should be conducted through the creation of a arm manipulator robot simulation and analysis before realization. The simulation program of a arm manipulator robot can be the basic of determining the necessary parameters in the realization process later. This study showed that the angle, to achieve the desired target point despite having error below 2%, the trajectory has an average deviation of 18%. Any change in the mass of the mass change link 1 and link 2 will affect value $\ddot{\theta}_1$ and $\ddot{\theta}_2$.

Key Words: *Fuzzy-PD, DOF, Inverse And Forward Kinematic, Dynami*

1. Pendahuluan

Penelitian tentang robot *Arm Manipulator* ini banyak difokuskan pada sistem kontrolnya. Sistem ini digunakan untuk mengendalikan robot agar dapat melakukan proses eksekusi secara optimal. Pengendalian secara optimal yang dimaksud disini adalah dalam menangani obyek, robot *arm manipulator* dapat menentukan sudut dengan *error* kecil untuk mencapai target [1]. Penerapan robot *arm manipulator* banyak ditemukan di industri untuk mengelas serta mengecat pada industri otomatif, sedangkan pada industri kimia untuk *packaging* dan *filling*. Aplikasi robot ini dapat juga digunakan di daerah yang berbahaya serta tidak memungkinkan dijangkau manusia, misalnya industri nuklir [2]. Berkat adanya teknologi robot *arm manipulator* ini ada batasan jarak antara manusia dengan obyek yang akan dikerjakan. Berdasarkan hal ini penggunaan robot *arm manipulator* sebagai alat bantu kerja merupakan alternatif yang aman bagi manusia untuk bekerja.

Definisi tentang Robot *arm manipulator* adalah sebuah mekanisme pergerakan yang tersusun dari beberapa bagian secara seri yang terhubung dengan sebuah poros yang bergerak melingkar maupun bergeser yang memiliki derajat kebebasan DOF (*Degree of Freedom*). Robot ini bisa bergerak dengan pengendali secara *teleoperate* maupun otomatis [3]. Menentukan pergerakan robot memerlukan teori kinematik, dimana kinematik merupakan ilmu yang mempelajari posisi, kecepatan, percepatan dan semua turunan dari posisi yang terkait dengan waktu (*t*). Penerapan tentang kinematik dari *arm manipulator* berhubungan dengan pergerakan secara geometri dan waktu (*t*) selama bergerak [4][5].

Pada proses sebelum realisasi pembuatan robot, memerlukan *study* awal untuk melakukan analisis. Analisis yang dilakukan akan melibatkan banyak model matematis kompleks yang terkait dengan sistem kontrol maupun *kinematic*. *Study* awal dalam analisis robot bisa berupa pendekatan model simulasi. Pendekatan model simulasi pada *study* awal dapat mendeskripsikan respon robot sehingga dapat digunakan untuk menentukan parameter input, *gain*, *attenuate* serta faktor kesalahan dari sistem kontrol [6]. Model matematis yang digunakan pada simulasi ini tidak terlepas dengan kinematika robot, yang merepresentasikan dari perubahan titik koordinat pergerakan robot. Penggunaan simulasi ini dapat membantu *designer* atau peneliti tentang robot, dapat menghindari kesalahan yang mengakibatkan kerugian [7]. Selain pemodelan kinematika robot, agar analisis terhadap robot *arm manipulator* bisa mendekati realisasinya memerlukan unsur *force* dalam pemodelan matematisnya. Unsur *force* ini terdapat dalam persamaan *dynamic* sehingga efek perubahan beban akan mempengaruhi dari pergerakan robot *arm manipulator* [8].

Sistem kontrol pergerakan robot *arm manipulator* ini memerlukan suatu metode, tanpa adanya metode ini robot tidak dapat menentukan titik target yang diinginkan. Fuzzy merupakan salah satu solusi sistem kontrol untuk menggerakkan robot *arm manipulator* untuk mencapai target [1][9].

Berdasarkan hal ini maka perlu dilakukan penelitian awal melalui pembuatan simulasi robot *arm manipulator* serta analisisnya sebelum dilakukan pembuatan atau realisasi. Sistem kontrol yang digunakan adalah fuzzy-PD sehingga titik target dapat dicapai. Harapannya adalah dengan adanya program simulasi robot *arm manipulator* dapat menjadi dasar untuk menentukan parameter-parameter yang diperlukan pada proses realisasinya nanti.

2. Tinjauan Pustaka

A. Kinematik *Arm Manipulator*

Pergerakan robot *arm manipulator* untuk mencapai target yang dikehendaki setelah dilengkapi dengan sistem kontrol memerlukan suatu proses perhitungan matematis. Perhitungan matematis ini terkait dengan posisi orientasi dan sudut lengan yang dibentuk oleh robot *arm manipulator*. Pergerakan robot *arm manipulator* perlu disensing dengan menggunakan sensor internal berupa *encoder* untuk dapat menerapkan persamaan kinematik ini. Persamaan

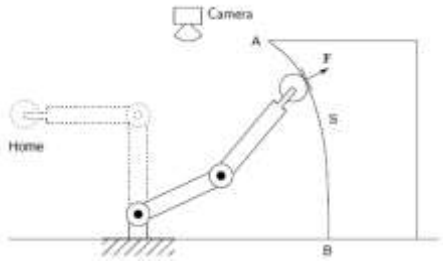
kinematik dari robot *arm manipulator* dapat di-*plot*-kan dalam koordinat kartesian 2 dimensi. Persamaan kinematik terdiri dari 2, yaitu *inverse* dan *forward kinematic* [10].

Pada Gambar 1 dan Gambar 2, bahwa untuk dapat mengukur sudut pada sendi θ_1 dan θ_2, sensor yang digunakan berupa *rotary encoder*, sehingga robot *arm manipulator* dapat mengekspresikan ke posisi A dan B. Hubungan antara sudut sendi *Q* ke orientasi dari posisi target dalam koordinat kartesian *W* dijabarkan dalam *forward kinematic* pada Persamaan (1), dimana sudut sendi *q* dirubah ke orientasi posisi x.

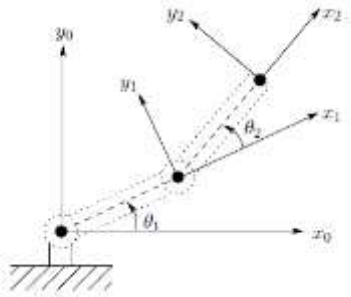
$$f : Q \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow W \subseteq \mathbb{R}^n \quad q \mapsto x \tag{1}$$

Apabila dari posisi target ke sudut sendi dijabarkan dalam *Inverse kinematic* pada Persamaan (2), dimana orientasi posisi x dirubah ke sudut sendi *q*.

$$f : W \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow Q \subseteq \mathbb{R}^m \quad x \mapsto q \tag{2}$$



Gambar 1. Robot dengan *Two-Link Planar* [8].



Gambar 2. Koordinat Robot *two-link planar* (2 DOF) [8].

Berdasarkan Gambar 2 untuk menentukan target koordinat (*x*,*y*), dapat mengikuti Persamaan (3) dan Persamaan (4).

$$x = x_2 = \alpha_1 \cos\theta_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{3}$$

$$y = y_2 = \alpha_1 \sin\theta_1 + \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{4}$$

dimana : α_1 dan α_2 merupakan panjang dari masing-masing lengan. Menurut orientasi dari gerak relatif koordinat dari ujung lengan *manipulator* sampai ke *base frame* diberikan dengan *direction cosine* dari x_2 dan y_2 axis relatif dari x_0 dan y_0 axis mengikuti Persamaan (5).

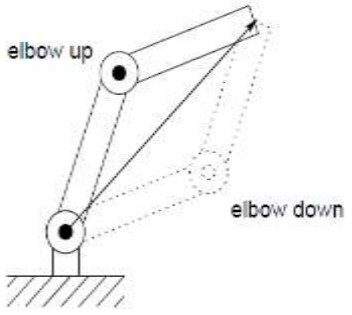
$$\begin{aligned} x_2.x_0 &= \cos(\theta_1+\theta_2); \quad x_2.y_0 = -\sin(\theta_1+\theta_2) \\ y_2.x_0 &= \sin(\theta_1+\theta_2); \quad y_2.y_0 = \cos(\theta_1+\theta_2) \end{aligned} \tag{5}$$

dimana Persamaan (5) dapat dikombinasikan dengan orientasi matrix.

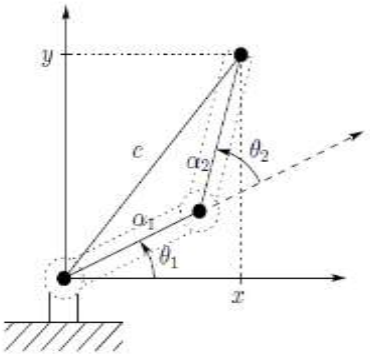
$$\begin{bmatrix} x_2.x_0 & x_2.y_0 \\ y_2.x_0 & y_2.y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2) & -\sin(\theta_1+\theta_2) \\ \sin(\theta_1+\theta_2) & \cos(\theta_1+\theta_2) \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Persamaan (3) sampai Persamaan (6) disebut sebagai *forward kinematic* untuk *arm manipulator* dengan 2 DOF. Perhitungan persamaan ini sedikit rumit dimana untuk prosedur yang dilakukan berdasarkan koordinat kartesian. Setiap poros akan terwakili dari semua transformasi secara sistematis pada koordinat kartesian dengan menggunakan transformasi matrix. Prosedur ini sesuai dengan referensi dari *Denavit-Hartenberg convention* [7][8].

Jika menginginkan robot *arm manipulator* bergerak ke suatu titik target dengan koordinat (*x*,*y*), maka untuk menentukan nilai sudut θ_1 dan θ_2 dibutuhkan *inverse kinematic*. Pada penyelesaian permasalahan ini ada dua solusi yang bisa dilakukan untuk mencapai koordinat target (*x*,*y*), yaitu dengan konfigurasi *elbow up* atau *elbow down*, sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Solusi *Multiple Inverse Kinematic* [7]



Gambar 4. Skema solusi untuk mencapai titik target (*x*,*y*) [7]

Salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk mencari sudut θ_2 guna mencapai target (*x*,*y*) dapat menggunakan hukum *Cosine* (Gambar 4), sehingga persamaan untuk menentukan θ_2 dapat ditentukan seperti Persamaan (7).

$$\cos\theta_2 = \frac{x^2 + y^2 + {\alpha_1}^2 + {\alpha_2}^2}{2\alpha_1\alpha_2} := D$$
$$\theta_2 = \cos^{-1}(D) \quad (7)$$

Berdasarkan Persamaan (7) maka sin(θ_2) dapat ditentukan dengan Persamaan (8), sehingga θ_2 dapat ditentukan dengan Persamaan (9).

$$\sin\theta_2 = \pm\sqrt{1-D^2} \quad (8)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\frac{\sqrt{1-D^2}}{D} \quad (9)$$

Setelah sudut θ_2 dapat ditentukan maka untuk sudut θ_1 dapat mengikuti Persamaan (10).

$$\theta_1 = \tan^{-1}(y/x) - \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_2\sin\theta_2}{\alpha_1 + \alpha_2\cos\theta_2}\right) \quad (10)$$

Agar sudut θ_3 tegak lurus terhadap sumbu *x*, maka dapat dicari dengan Persamaan (11).

$$\theta_3 = -\theta_2 - \theta_1 \quad (11)$$

B. *Dynamic Arm Manipulator*

Perbedaan antara *dynamic* dengan *kinematic* adalah *kinematic* menjelaskan tentang pergerakan robot *arm manipulator* tanpa memperhitungkan gaya (F) dan torsi (τ). *Dynamic* memperhitungkan gaya (F) dan torsi (τ) dalam hubungannya untuk menentukan gerak robot *arm manipulator*. Persamaan *dynamic* ini diperlukan untuk mendesain simulasi robot *arm manipulator* yang dilengkapi dengan sistem kontrol.

Pada persamaan *dynamic* ini menggunakan persamaan *Euler-Lagrange* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (12). Hasil persamaan ini merupakan selisih antara energi kinetik dengan energi potensial yang dihasilkan oleh robot *arm manipulator* [8].

$$L = E_K - E_P \quad (12)$$

Persamaan *dynamic* untuk robot *arm manipulator* dengan 3 DOF dengan menggunakan langrange dapat ditentukan dengan Persamaan (13).

$$L = \sum E_K - \sum E_P \quad (13)$$

Berdasarkan Persamaan (13), maka langrange untuk robot *arm manipulator* dengan 3 DOF, dimana *link* 3 (*end effector* / EE) adalah pasif, dapat mengikuti Persamaan (14) sampai Persamaan (20).

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2}\left[m_a{a_1}^2 + I_1 + m_b{l_1}^2\right]\dot{\theta}_1^2 \\ &+ \frac{1}{2}\left[m_a{a_2}^2 + I_2\right]\dot{\theta}_2^2 \\ &+ m_b l_1 a_2\cos(\theta_1-\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ &- m_a g a_1\cos\theta_1 - m_b g l_1\cos\theta_1 \\ &- m_b g a_2\cos\theta_2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \left[m_a{a_1}^2 + I_1 + m_b{l_1}^2\right]\ddot{\theta}_1 \\ &+ m_b l_1 a_2\cos(\theta_1-\theta_2)\ddot{\theta}_2 \\ &- m_b g l_1\sin\theta_1\dot{\theta}_1 + m_b l_1 a_2\sin(\theta_1-\theta_2)\dot{\theta}_2^2 \\ &- m_a g a_1\dot{\theta}\sin\theta_1 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \left[m_b{a_2}^2 + I_2\right]\ddot{\theta}_2 \\ &+ m_b l_1 a_2\cos(\theta_1-\theta_2)\ddot{\theta}_1 + m_b g a_2\dot{\theta}_2\sin\theta_2 \\ &- m_b l_1 a_2\sin(\theta_1-\theta_2)\dot{\theta}_1^2 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 &= \frac{\tau_1}{\left[m_a{a_1}^2 + I_1 + m_b{l_1}^2\right]} \\ &- \frac{m_b l_1 a_2}{\left[m_a{a_1}^2 + I_1 + m_b{l_1}^2\right]}\cos(\theta_1-\theta_2)\ddot{\theta}_2 \\ &+ \frac{m_b g l_1}{\left[m_a{a_1}^2 + I_1 + m_b{l_1}^2\right]}\sin\theta_1\dot{\theta}_1 \\ &- \frac{m_b l_1 a_2}{\left[m_a{a_1}^2 + I_1 + m_b{l_1}^2\right]}\sin(\theta_1-\theta_2)\dot{\theta}_2^2 \\ &+ \frac{m_a g a_1}{\left[m_a{a_1}^2 + I_1 + m_b{l_1}^2\right]}\dot{\theta}\sin\theta_1 \end{aligned} \quad (17)$$

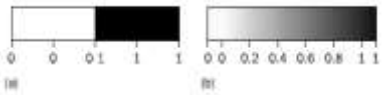
$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\tau_2}{\left[m_b a_2^{\,2} + I_2\right]} - \frac{m_b l_1 a_2}{\left[m_b a_2^{\,2} + I_2\right]}\cos(\theta_1 - \theta_2)\ddot{\theta}_1 - \frac{m_b g a_2}{\left[m_b a_2^{\,2} + I_2\right]}\dot{\theta}_2 \sin\theta_2 + \frac{m_b l_1 a_2}{\left[m_b a_2^{\,2} + I_2\right]}\sin(\theta_1 - \theta_2)\dot{\theta}_1^{\,2} \quad (18)$$

$$\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_1 + \int \ddot{\theta}_1 + dt \;\text{ dan }\; \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_2 + \int \ddot{\theta}_2 + dt \quad (19)$$

$$\theta_1 = \theta_1 + \int \dot{\theta}_1 + dt \;\text{ dan }\; \theta_2 = \theta_2 + \int \dot{\theta}_2 + dt \quad (20)$$

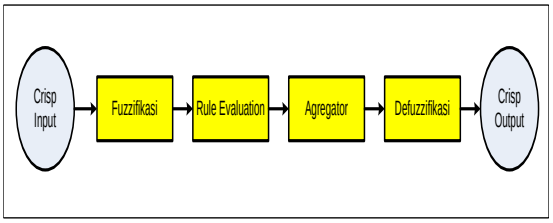
C. Sistem Kendali Fuzzy-PD (*Proportional Defferential*)

Logika fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfy A. Zadeh dari Universitas California di Barkeley (1965). Logika Fuzzy ini berbeda dengan logika *Boolean* dimana keadaan hanya menjadi dua kondisi yaitu 0 dan 1 sedangkan logika fuzzy memberikan kemungkinan suatu keadaan dalam interval antara 0 dan 1.



Gambar 5. Perbedaan antara Logika Boolean (a) dan Logika Fuzzy (b) [11]

Sistem kendali *fuzzy* adalah metodologi disain sistem kendali yang berbasiskan pada *fuzzy logic*. Definisi *fuzzy logic* berarti operasi logika yang menggunakan aturan *if-then rules*, dimana kendali fuzzy mengkombinasikan aturan *if-then* tersebut untuk menghitung input sistem kontrol. Penyelesaian sistem kendali menggunakan *fuzzy logic controller* disusun dengan langkah-langkah sebagai berikut yaitu: unit Fuzzifikasi, unit *Rule Evaluation*, *Agregator* dan Defuzzifikasi.



Gambar 6. Tahapan pada*Fuzzy Logic Controller*

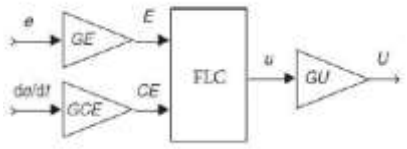
Dalam sistem *fuzzy logic controller*, *crisp input* akan dirubah ke dalam *degree of membership* (derajat keanggotaan) fuzzy pada unit fuzzifikasi. Derajat keanggotaan ini disimpan dan dikombinasikan sesuai dengan aturan *rulebase* (basis aturan) pada *rule evaluation* untuk menghasilkan pemotongan konsekuen fuzzy set (*aggregator*). Defuzzifikasi adalah proses untuk merubah *inference fuzzy control action* ke dalam *crisp output* untuk *control actio*n [11].

Langkah pertama untuk mendesain sistem *fuzzy logic controller* adalah mengambil nilai *crips input*, dan menentukan fungsi derajat keanggotaan (*degree of membership function*) untuk masing-masing fuzzy set yang sesuai. Fungsi derajat keanggotaan fuzzy memainkan peranan yang sangat penting untuk merepresentasikan masalah dan menghasilkan keputusan yang akurat. Terdapat banyak sekali fungsi derajat keanggotaan, sedangkan yang umum digunakan adalah tipe Z, tipe S, tipe π segitiga dan tipe π trapesium.

Crips input merupakan nilai numerik yang terbatas pada semesta pembicaraan (*universe of discourse*). Rentang dari semesta pembicaraan dapat ditentukan berdasarkan persepsi dari seorang ahli permasalahan yang akan diselesaikan.

Tahapan *rule evaluation* adalah tahapan untuk menggunakan aturan (*rule*) untuk menentukan aksi apa yang harus dilakukan. Sebuah basis aturan adalah sekumpulan rule *if-then fuzzy* yang secara khusus menghubungkan antara variabel linguistik dan output dari sistem kontrol. Secara umum rule *if-then* mempunyai *antecedent*, yaitu masukan yang telah defuzzifikasi dan *consequents* sebagai aksi pengendalian (keluaran). Hubungan antara *antecedent* dan *consequent* disebut aturan (rule), dan antara satu rule dengan yang lain tidak terdapat hubungan sebab akibat.

Apabila FLC ini diaplikasikan pengaturan motor DC, maka metode yang digunakan adalah FPD (*Fuzzy Proportional Derivative*) dimana respon akan mengikuti sinyal yang diberikan seperti kontrol PD. Meskipun kontrol ini dibangun dengan PD tetapi tetap menggunakan model *fuzzy rule* [12].



Gambar 6. Blok Diagram FPD Control [12]

Sinyal kontrol U(n) adalah fungsi nonlinier dari error (e) dan delta error (ė), seperti yang direpresentasikan pada Persamaan (21).

$$U(n) = f(GE \times e(n), GCE \times \dot{e}(n)) \times GU \quad (21)$$

dimana f merupakan algoritma kontrol, sebuah pendekatan linier yang harus diperoleh dengan pilihan sesuai Persamaan (22) sampai Persamaan (24).

$$f(GE \times e(n), GCE \times \dot{e}(n)) \approx GE \times e(n) + GCE \times \dot{e}(n) \quad (22)$$

$$U(n) = f(GE \times e(n), GCE \times \dot{e}(n)) \times GU \quad (23)$$

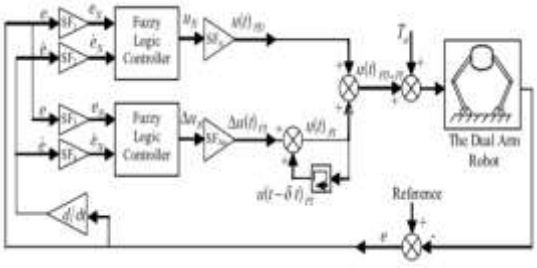
$$U(n) = GE \times GU \times \left(e(n) + \frac{GCE}{GE} + \dot{e}(n) \right) \quad (24)$$

Ketika dibandingkan persamaan ini dengan sinyal kontrol dari *crisp* PD kontroler, hubungan antara gain kontrol PD dan kontroler FPD dapat mengikuti Persamaan (25) dan Persamaan (26).

$$GE \times GU = Kp \quad (25)$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_D \quad (26)$$

Akibatnya, nilai parameter pengontrol FPD linier dapat ditentukan dari seting kontroler PD.



Gambar 7. Sistem kontrol FPD pada *arm manipulator* [1].

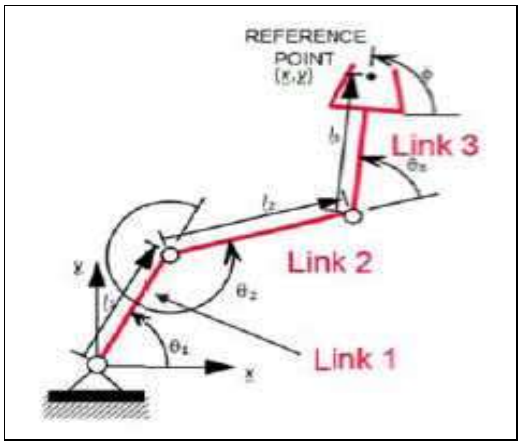
Defuzifikasi adalah proses pemetaan dari bagian pengambilan keputusan aksi kendali fuzzy ke bagian aksi kontrol non fuzzy (*crisp*). Dalam defuzzifikasi, nilai crisp dihitung dari konsequent monolitik. Output defuzzifikasi secara umum dapat dihitung dengan Persamaan (26).

$$z = \frac{\int_{j=1}^{j} z_j . \mu(z_j)}{\int_{j=1}^{j} \mu(z_j)} \quad (27)$$

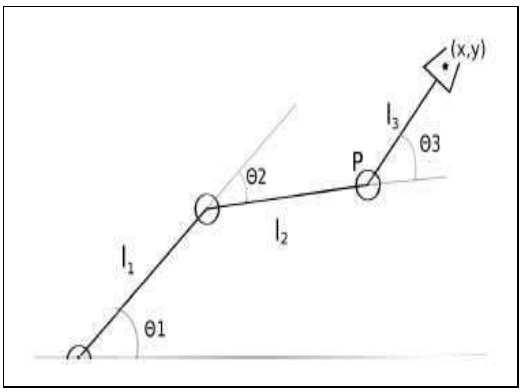
Salah satu keuntungan dari defuzzifikasi centroid adalah metode ini menggambarkan kesimpulan menggunakan lebih banyak informasi yang tersedia dari fungsi keanggotaan monolitik. Hal ini dapat disimpulkan bahwa lebih banyak rule dari basis aturan diambil sebagai pertimbangan ketika memutuskan output akhir.

3. Metode Penelitian

Robot *arm manipulator* 3 DOF terdiri dari *link* 1 (*shoulder*), *link* 2 (*elbow*) dan *link* 3 (EE), dimana pada penelitian ini *link 3* dibuat pasif.



Gambar 8. Struktur fisik *three-link planar* 3 DOF [7].



Gambar 9. Geometri robot *arm manipulator* 3 DOF [7]

EE adalah ujung dari robot *arm manipulator* yang terpasang perangkat khusus. Perangkat ini memiliki fungsi sebagai tangan akan berhubungan langsung dengan obyek dan lingkungan serta tugas yang dijalankan dari robot *arm manipulator*. Beberapa contoh perangkat yang digunakan sebagai EE adalah pemotong, bos, grippers, magnet, obeng, *spray guns*, *vacuum cups*, *welding guns* dan masih banyak lagi. Selain itu EE memiliki titik referensi sudut dari poros adalah (θ_1, θ_2, θ_3) dan koordinat dari EE adalah (x,y,ϕ). Secara geometri robot *arm manipulator* dengan 3 DOF ini memiliki persamaan kinematik sesuai dengan Persamaan (28).

$$\begin{aligned} x &= l_1\cos(\theta_1)+l_2\cos(\theta_1+\theta_2)+l_3\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3) \\ y &= l_1\sin(\theta_1)+l_2\sin(\theta_1+\theta_2)+l_3\sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3) \\ \phi &= \theta_1+\theta_2+\theta_3 \end{aligned} \quad (28)$$

Berdasarkan Persamaan (28), maka koordinat titik P dapat ditentukan dengan Persamaan (29).

$$P=(x-l_3\cos(\phi), y-l_3\sin(\phi)) \quad (29)$$

Nilai P_x dan P_y dapat dicari dengan Persamaan (30).

$$\begin{aligned} P_x &= l_1\cos(\theta_1)+l_2\cos(\theta_1+\theta_2) \\ P_y &= l_1\sin(\theta_1)+l_2\sin(\theta_1+\theta_2) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \cos(\theta_1+\theta_2) &= \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)-\sin(\theta_1)\sin(\theta_2) \\ \sin(\theta_1+\theta_2) &= \sin(\theta_1)\cos(\theta_2)-\cos(\theta_1)\sin(\theta_2) \end{aligned} \quad (31)$$

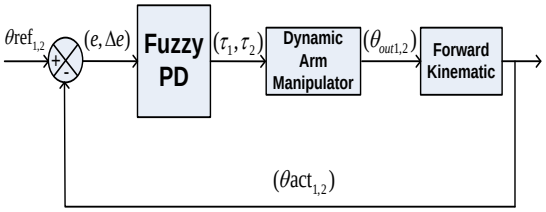
$$\begin{aligned} P_x^2+P_y^2 &= l_1^2+l_2^2+2l_1l_2\cos(\theta_2) \\ \Rightarrow \cos(\theta_2) &= \frac{P_x^2+P_y^2-l_1^2-l_2^2}{2l_1l_2} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \sin(\theta_2) &= \pm\sqrt{1-\cos(\theta_2)} \\ \Rightarrow \theta_2 &= \tan^{-1}(\sin(\theta_2),\cos(\theta_2)) \end{aligned} \quad (33)$$

Dengan memberikan nilai θ_2 dan memasukkan dalam Persamaan (30) maka dapat dibuat linier sistem seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (34).

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1+l_2\cos(\theta_2) & -l_2\sin(\theta_2) \\ l_2\cos(\theta_2) & l_1+l_2\cos(\theta_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (34)$$

Pembuatan simulasi ini menggunakan program komputer dimana pergerakan robot *arm manipulator* ini akan dijalankan secara visual. Hal yang perlu dipahami pada saat pembuatan program simulasi ini adalah *programming*, konsep matematik terutama tentang geometri, serta kinematik dari robot *arm manipulator*.



Gambar 10. Blok diagram sistem fuzzy-PD pada simulasi robot *arm manipulator* 3 DOF

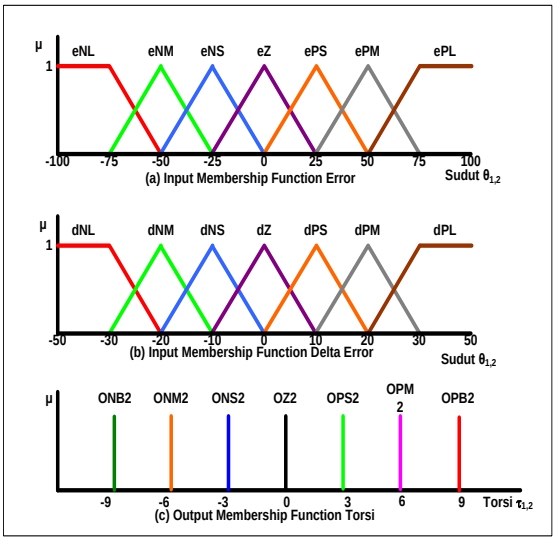
Sistem yang dirancang dalam penelitian disini mengacu pada Gambar 11. Prinsip kerjanya adalah pada saat diberikan input titik target (x,y), titik ini dapat dirubah ke bentuk sudut untuk *link* 1 dan *link* 2, dengan *inverse kinematic*. Sistem kontrol fuzzy-PD akan mengoreksi kesalahan sudut yang dibentuk dari hasil visualisasi robot *arm manipulator*. Sistem kontrol fuzzy-PD ini menggunakan 4 *input* (*error* θ_1, *error* θ_2, Δ*error* θ_1 dan Δ*error* θ_2) dan 2 *output* (τ_1 dan τ_2). Fuzzifikasi dari *input* dan *output* mengikuti Gambar 12, dimana setiap *input* dibagi menjadi 7 *membership function*.

Pada *membership function input* tersebut, dibagi menjadi 3 rentang nilai yaitu nilai negatif, nol dan positif. Hal ini dikarenakan kemungkinan terjadi kesalahannya bisa bernilai ketiga rentang nilai tersebut. *Membership function output*, sedangkan untuk *rule evaluation* mengikuti Tabel 1.

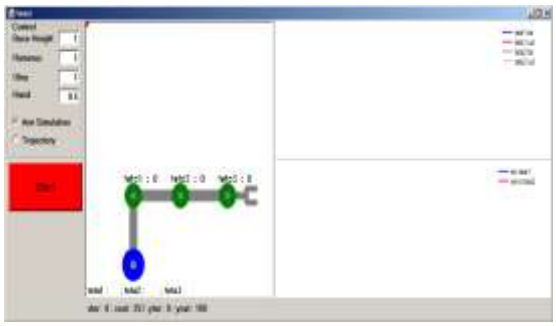
Output dari fuzzy-PD ini kemudian dimasukkan dalam persamaan *dynamic* sesuai Persamaan (12) sampai Persamaan (18), sehingga efek energi kinetik dan potensialnya dapat dimasukkan. Hasil dari proses *dynamic* ini menghasilkan percepatan sudut $\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$.

Tabel 1. *Rule evaluation* Fuzzy-PD

		Error						
		eNL	eNM	eNS	eZ	ePS	ePM	ePL
Delta Error	dNL	OPB	OPB	OPB	OPM	OPS	OPS	OZ
	dNM	OPB	OPB	OPM	OPS	OPS	OZ	ONS
	dNS	OPB	OPM	OPS	OPS	OZ	ONS	ONM
	dZ	OPM	OPS	OPS	OZ	ONS	ONS	ONM
	dPS	OPM	OPS	OZ	ONS	ONS	ONM	ONB
	dPM	OPS	OZ	ONS	ONS	ONM	ONB	ONB
	dPL	OZ	ONS	ONS	ONM	ONB	ONB	ONB



Gambar 11. Fuzzifikasi *input* dan *output*.



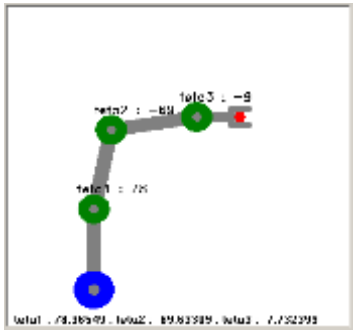
Gambar 10. Tampilan simulasi robot *arm manipulator*

Proses selanjutnya adalah *forward kinematic*, karena *input* dari proses ini berupa sudut maka percepatan sudut $\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$ di-integral-kan dengan menggunakan Persamaan (19) dan Persamaan (20).

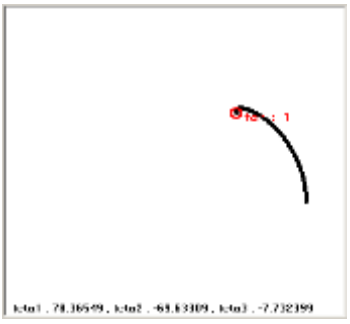
4. Hasil dan Pembahasan

Setelah dilakukan pembuatan program simulasi, dengan menggunakan sistem kontrol Fuzzy-PD serta mengikuti blok diagram pada Gambar 11, hasilnya pada Gambar 12. Skala yang digunakan untuk simulasi ini adalah 1 piksel = 1 cm sedangkan kecepatan dalam satuan gerak robot 10 cm/detik. Agar respon dari pergerakan robot *arm manipulator* pada program simulasi ini dapat diketahui, maka perlu dilakukan pengujian. Proses pengujian ini titik target ditentukan oleh posisi yang sudah ditandai. Selama menggunakan program simulasi ini, nilai gravitasi 9,8 m/s^2 panjang *shoulder* dan *elbow* 1 m.

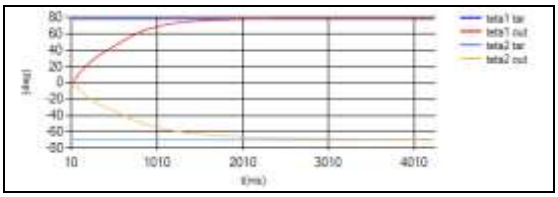
Program simulasi robot *arm manipulator* dapat bergerak serta membentuk lintasan menuju titik target yang dimasukkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 15. Secara paralel, dalam program ini juga terdapat grafik respon robot dalam mencapai sudut target serta kesalahan (*error*) yang telah dicapai (Gambar 16-17). Pada grafik nilai *error*, sistem selalu berusaha mencapai *error* minimal saat mencapai target.



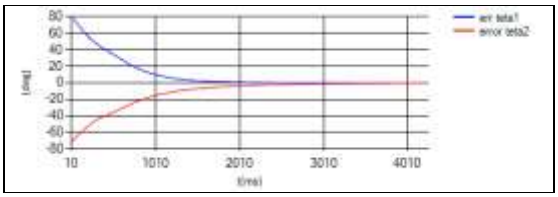
Gambar 11. Pengujian pada saat (*x*,*y*) sama dengan (169,214).



Gambar 12. *Trajectory* pada saat start sampai ke titik target



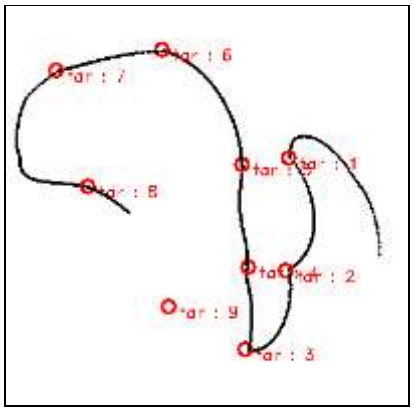
Gambar 13. Respon sudut pada saat *start* sampai ke titik target.



Gambar 14. Nilai *error* pada saat start sampai ke titik target.

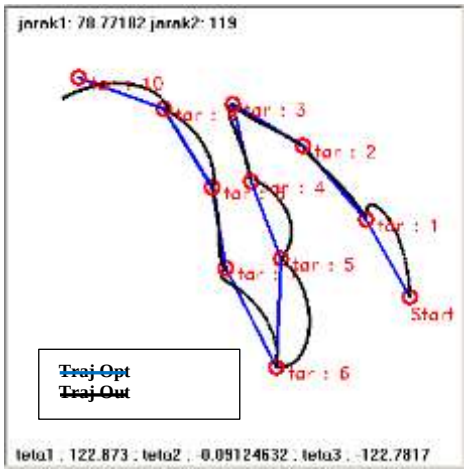
Tabel 2. Hasil pengujian posisi target

Sudut target		Sudut Out		Error	
θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
79.325	-85.146	79.345	-84.89	0.03%	0.30%
47.193	-109.123	47.292	-107.896	0.21%	1.12%
6.2	-108.566	6.3	-107.477	1.61%	1.00%
57.497	-131.67	57.438	-132.166	0.10%	0.38%
103.8	-122.423	103.799	-122.504	0.00%	0.07%
110.045	-41.319	110.033	-41.47	0.01%	0.37%
134.552	-30.172	134.5	-30.729	0.04%	1.85%
199.78	-126.1	199.835	-125.411	0.03%	0.55%



Gambar 15. Gambar lintasan (*trajectory*) robot *arm manipulator*.

Berdasarkan pengujian untuk mencapai pada posisi target, hasilnya seperti yang ditampilkan pada Tabel 2. Pada pengujian ini bahwa nilai *error* dibawah 2%, sehingga dapat disimpulkan bahwa fuzzy-PD ini dapat digunakan sebagai salah satu solusi sistem kontrol untuk robot *arm manipulator*.

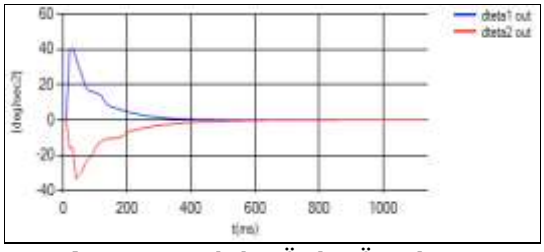


Gambar 16. Gambar lintasan (*trajectory*) robot arm manipulator.

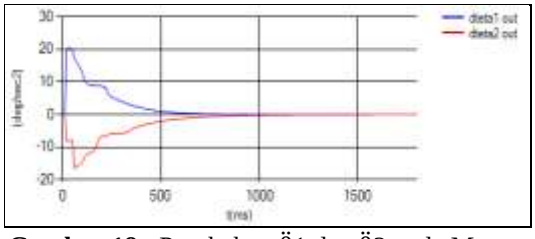
Tabel 3. Hasil pengujian posisi target

Trajectory Optimal	Trajectory Output	Error
77	99	29%
84	87	4%
71	82	15%
69	83	20%
72	92	28%
94	120	28%
97	99	2%
71	77	8%
80	104	30%
Rata-rata Error		18%

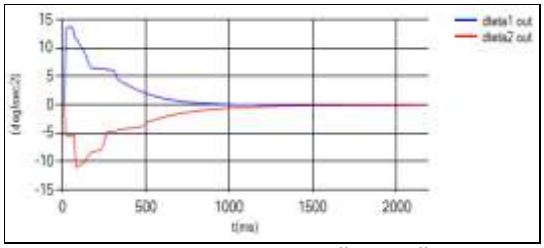
Meskipun robot ini dapat mencapai target yang diinginkan tetapi masih terdapat kekurangan pada *trajectory* untuk mencapai target. Kekurangan tersebut adalah *trajectory* yang dihasilkan pada robot *arm manipulator* penyimpangan rata-rata 18% dalam 9 kali pengujian. Selain pengujian dengan *trajectory* yang dihasilkan dalam mencapai target, dalam penelitian ini juga dilakukan pengujian tentang pengaruh dari massa *link 1* dan *link 2*. Pada pengujian ini dicoba dengan nilai massa *link 1* dan *link 2* yang berbeda. Keluaran yang akan dilihat hasilnya adalah percepatan sudut $\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$.



Gambar 17. Perubahan$\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$ pada Massa L1 dan L2 sama dengan 0.1 kg



Gambar 18. Perubahan θ̈1 dan θ̈2 pada Massa L1 dan L2 sama dengan 0.2 kg



Gambar 19. Perubahan θ̈1 dan θ̈2 pada Massa L1 dan L2 sama dengan 0.3 kg

Tabel 4. Hasil Pengujian dengan massa L1 dan L2 berbeda

Massa link1 (kg)	Massa link2 (kg)	$\ddot{\theta}_1$Maks (deg/sec2)	$\ddot{\theta}_2$Maks (deg/sec2)
0.1	0.1	40.33	-30.33
0.2	0.2	20.33	-16.47
0.3	0.3	13.66	-11
0.4	0.4	10.34	-8.32
0.5	0.5	8.34	-6.43
0.6	0.6	7.01	-5.67
0.7	0.7	6.06	-4.91
0.8	0.8	5.3	-4.3
0.9	0.9	4.8	-3.89
1	1	4.36	-3.54

Berdasarkan pengujian dengan menggunakan massa yang berbeda untuk *link 1* dan *link 2*, terlihat bahwa kecepatan sudut $\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$ juga mengalami perbedaan juga (Gambar 20-21). Setelah dilakukan pengujian dengan 10 nilai massa yang berbeda pada *link 1* dan *link 2*, maka hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

5. Kesimpulan

Penambahan sistem kontrol fuzzy-PD pada robot *arm manipulator*, dapat menggerakkan robot untuk mencapai titik target yang diinginkan meskipun memiliki *error* di bawah 2%. Titik target tersebut perlu dirubah ke dalam bentuk sudut dengan menggunakan *inverse kinematic*. Pada saat mencapai titik target robot *arm manipulator* juga membentuk lintasan/*trajectory*. *Trajectory* yang dibentuk ini masih kurang optimal karena memiliki simpangan rata-rata sebesar 18%. Selain itu, juga bahwa dengan melihat hasil pengujian simulasi robot ini, adanya perubahan massa *link 1* dan *link 2* akan mempengaruhi hasil $\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$. Hal ini karena adanya persamaan *dynamic* yang digunakan dalam program simulasi robot *arm manipulator* ini. Setelah didapatkan hasil $\ddot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2$ untuk menggambarkan dalam bidang 2 dimensi diperlukan persamaan *forward kinematic*.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan pada pengujian program simulasi robot *arm manipulator* ini adalah bahwa terdapat hubungan antara *inverse kinematic, forward kinematic* serta *dynamic*. Ketiga persamaan itu tidak bisa dilepaskan dalam analisis robot khususnya *arm manipulator*.

6. Saran

Penelitian yang telah dilakukan masih terdapat kekurangan, kekurangan tersebut diantaranya adalah bahwa *trajectory* yang dihasilkan masih memiliki simpangan yang besar, sehingga diperlukan metode khusus untuk menangani hal ini misalnya *shortest path*. Penggunaan metode ini dalam penelitian selanjutnya diharapkan dapat lebih optimal dalam mencapai titik target yang diinginkan.

Daftar Pustaka

[1] Bezinea. H, Derbelb. N, Alimi. A.M, [2002], "Fuzzy Control Of Robot Manipulators:Some Issues On Design And Rule Base Size Reduction", Science Direct, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 15 (2002), pp.401–416.

[2] Braunl, T., [2008], *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Aplication with Embedded Systems*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Inc.

[3] Sandler Ben-Zion., [1999], *Robotics Designing the Mechanisms for Automated Machinery 2nd*, California, Academic Press, 525 B. Suite 1900, San Diego, California 92101-4495, USA.

[4] Craig, J John., [1989], *Introduction to Robotics Mechanics and Control 2nd*, Canada, Addison-Wesley Series in Electrical and Computer Engineering : Control Engineering.

[5] Effendi .S, Pambudi W.S., Minarni Y., [2013]. "Aplikasi Kinematik pada Simulasi Pergerakan Robot Arm Manipulator 3 DOF (Degree of Freedom", *Jurnal Manajemen Informatika* Vol. VI No.2, Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang, pp.34-38.

[6] Pambudi W. S., Purwanto D., Sardjono T.A., [2011], "Pengembangan Sistem Penghindar Halangan Dinamis Menggunakan Metode Anfis pada Simulasi Three

Wheels Omni-Directional Mobile Robot", *Prosiding Seminar Nasional Sistem dan Teknologi Informasi* (SNASTI 2011), Surabaya, pp. ICCS 1-9.

[7] Kaur J., Banga V. K, "Simulation Of Robotic Arm Having Three Link Manipulator", *International Journal of Research in Engineering and Technology* (IJRET) Vol. 1 No. 2 March, 2012 ISSN: 2277-4378, pp.105-108.

[8] Colom´e Adri`a, [2011], "Smooth Inverse Kinematics Algorithms for Serial Redundant Robots", Master Thesis, Institut de Rob`otica i Inform`atica Industrial (IRI), Consejo Superior de Investigaciones Cient´ıficas (CSIC), Universitat Polit`ecnica de Catalunya (UPC), Barcelona.

[9] Hacioglu. Y, Arslan. Y. Z, Yagiz. N, [2008], "PI+PD Type Fuzzy Logic Controlled Dual-Arm Robot in Load Transfer", *Journal of Mechanical Engineering* 54 (2008), pp.347-355.

[10] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar [2001], *Robot Modeling and Control 1st*, New York, John Wiley & Sons, Inc.

[11] Negvevitsky, M. [2002], *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent System*. Sydney : Addison Wesley.

[12] Manafeddin Namazov, Onur Basturk [2010], "DC Motor Position Control Using Fuzzy Proportional-Derivative Controllers With Different Defuzzification Methods", TJFS: Turkish Journal of Fuzzy Systems (eISSN: 1309–1190) *An Official Journal of Turkish Fuzzy Systems Association* Vol.1, No.1, pp. 36-54.