

## طراحی، مدل سازی و ساخت یک مکانیزم آکروبات و برقراری ارتباط آن با نرم افزار متلب

حسن صیدی<sup>(۱)</sup> - عباس حریفی<sup>(۲)</sup> - امیر زارع شهری<sup>(۳)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

(۲) استادیار - دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه هرمزگان

(۳) کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات هرمزگان

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۹۱

تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۹۲

**خلاصه:** امروزه کنترل سیستم‌های مکانیکی که تعداد ورودی آنها از تعداد خروجی آنها کمتر می‌باشد (Underactuated) یکی از مسائل چالش برانگیز مهندسان کنترل شده است. یکی از مثال‌های جذاب این دسته سیستم‌ها، مکانیزم دو درجه آزادی آکروبات می‌باشد. هدف از این مقاله طراحی، مدل‌سازی و ساخت یک سیستم آکروبات برای استفاده در آزمایشگاه‌های کنترل خطی، کنترل دیجیتال، رباتیک و هوش مصنوعی است. در این تحقیق ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks، مکانیزم مناسب (از لحاظ هزینه و سهولت ساخت) طراحی شد. سپس مکانیزم طراحی شده به صورت کاملاً دقیق ساخته شد. در مرحله بعد مدل دینامیکی سیستم ساخته شده با استفاده از معادلات اولر-لاگرانژ به دست آمد. در نهایت با استفاده از یک کارت تبادل داده (DAQ) و پیاده‌سازی تعدادی الگوریتم مناسب در محیط Simulink، ارتباط آکروبات و نرم‌افزار MATLAB جهت استفاده از سیستم ساخته شده به عنوان یک وسیله آزمایشگاهی برقرار گردید.

**کلمات کلیدی:** آکروبات، طراحی، ساخت، Underactuated، MATLAB، DAQ

### ۱- مقدمه

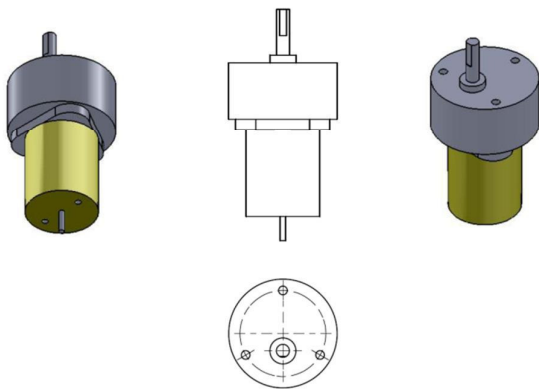
سیستم آکروبات یک بازوی ربات Underactuated دو درجه آزادی با مفاصل دورانی است که مفصل اول آن منفعل و مفصل دوم آن فعال می‌باشد. هدف کنترلی در این سیستم، انتقال بازوها از نقطه تعادل پایدار (وضعیتی که در آن هر دو بازو به صورت کاملاً عمودی آویزان هستند) به نقطه تعادل ناپایدار (وضعیتی که در آن هر دو بازو به صورت کاملاً عمودی رو به بالا قرار دارند) است. در واقع ایده ساخت این مکانیزم از حرکت بالانس ژیمناست‌ها بر روی وسیله بارفیکس اقتباس شده است. در این حرکت ژیمناست برای رسیدن به وضعیت بالانس تنها می‌تواند از پای خود استفاده کند و با استفاده از دست خود نمی‌تواند گشتاور مورد نیاز را تولید نماید. لذا در مقایسه این دو سیستم می‌توان گفت مفصل اول مکانیزم آکروبات مانند دست ژیمناست به صورت غیر فعال است. رابط اول ربات مانند دست و بدن ژیمناست (تا قبل از پا) می‌باشد و مفصل دوم دقیقاً معادل با محل اتصال پا به بدن می‌تواند به صورت فعال عمل کند به طوری که

ربات‌ها، امروزه جزء جدانشدنی زندگی بشری شده‌اند به گونه‌ای که انسان دائماً تأثیر آن را به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر زندگی خود حس می‌کند. لذا مطالعه بر روی سیستم‌های رباتیک در اولویت تمامی مراکز تحقیقاتی قرار دارد که به نحوی در مسیر پیشرفت تکنولوژی گام برمی‌دارند. در این میان سیستم‌های Underactuated یکی از مسائل جالب و چالش برانگیز علم رباتیک می‌باشند که تئوری‌های مهندسی کنترل را به صورت مناسبی در بطنه آزمایش قرار می‌دهند. Underactuated اصطلاحاً به سیستمی اطلاق می‌شود که تعداد ورودی‌های کنترلی آن از تعداد درجات آزادی آن کمتر باشد. نمونه بسیار مشهور این گونه سیستم‌ها، سیستم آونگ وارونه می‌باشد که تا کنون تحقیقات زیادی بر روی آن انجام شده است. بسیاری از سیستم‌های کاربردی دارای ماهیت Underactuated می‌باشند. برای مثال می‌توان به زیردریایی‌ها، شناورهای سطحی [۱]، ماهواره‌ها، دست‌های رباتیک [۲] و [۳]، ربات‌های متحرک و بازوهای ربات ماهر اشاره کرد [۴].

جایجایی بازوی دوم نیاز به اعمال گشتاور نسبتاً بالایی بود، موتور مورد نظر گیربکس دار انتخاب شد. شکل (۲) طرح رسم شده موتور را در نرم افزار SolidWorks نشان می دهد.



شکل (۱): موتور استفاده شده در این تحقیق  
Fig. (1): Used motor in this study



شکل (۲): طرح پیاده سازی شده موتور در SolidWorks  
Fig. (2): Plotted motor in SolidWorks

باید توجه داشت که برای کنترل آکروبات لازم است زاویه مفصل اول و زاویه مفصل دوم اندازه گیری شوند. بدین منظور از دو انکودر افزایشی شرکت Autonics با تفکیک پذیری ۱۰۰۰ پالس استفاده شد. شکل (۳) ظاهر انکودر استفاده شده را نشان می دهد. شکل (۴) طرح این انکودر را در نرم افزار SolidWorks نشان می دهد.



شکل (۳): انکودر استفاده شده در این تحقیق  
Fig. (3): Used Encoder in this study

ژیمناست با جابجا کردن پای خود می تواند گشتاور لازم برای حرکت بالانس را تولید نماید. و نهایتاً با نقش رابط دوم را بازی می کند.

سیستم آکروبات ویژگی های بسیار مناسبی جهت استفاده در آزمایشگاه های کنترل و رباتیک دارد به گونه ای که در بسیاری از دانشگاه ها و مراکز تحقیقاتی دنیا به عنوان یک سیستم عملی با کارایی مناسب مورد استفاده قرار می گیرد [۷]-[۱۵]. از ویژگی های این سیستم می توان به غیرخطی بودن دینامیک آن اشاره کرد [۸]. همچنین با توجه به Underactuated بودن دینامیک سیستم آکروبات، کنترل آن در دید اول عملی به نظر نمی رسد. به ویژه زمانی که هدف اصلی، کنترل بازوها در وضعیتی است که ناپایدار می باشند. لذا این مکانیزم به راحتی می تواند مزیت سیستم های کنترل حلقه بسته را در کنترل سیستم های پیچیده نشان دهد. همچنین یکی از ویژگی های این سیستم جذابیت بصری آن است به طوری که پس از کنترل سیستم توسط کامپیوتر، هر فرد با اندک دانش کنترلی نیز می تواند درک بهتری از مفهوم کنترل به دست آورد و به قابلیت دانش کنترل در مواجهه با یک مساله چالش برانگیز پی خواهد برد.

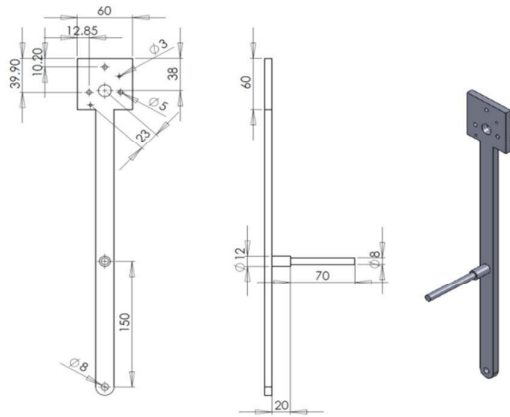
هدف از این مقاله طراحی و ساخت یک مکانیزم آکروبات با ساختار انعطاف پذیر به منظور استفاده در آزمایشگاه ها می باشد. بدین منظور ابتدا با استفاده از نرم افزار SolidWorks® قسمت های مکانیکی این سیستم طراحی شد. سپس با استفاده از معادلات اولر-لاگرانژ، مدل دینامیکی این مکانیزم به دست آمد. در نهایت با استفاده از یک کارت DAQ، بستر لازم برای اتصال این سیستم به کامپیوتر جهت پیاده سازی هر گونه ایده کنترلی از طریق ابزار توانمند نرم افزار MATLAB® به وجود آمد.

سازماندهی مقاله به این صورت می باشد: در بخش (۲) طراحی و ساخت مکانیزم آکروبات بیان شده است، سپس در بخش (۳) مدلسازی سیستم آکروبات مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه برقراری ارتباط بین آکروبات و کامپیوتر در بخش (۴) تشریح شده و در بخش (۵) پاسخ عملی سیستم ارائه شده است. بخش (۶) نیز به نتیجه گیری اختصاص دارد.

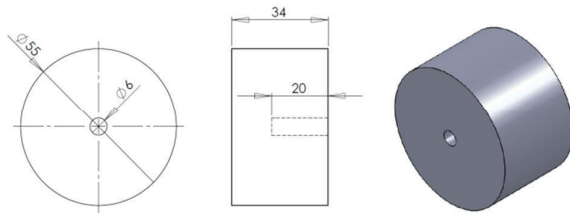
## ۲- طراحی و ساخت مکانیزم

یکی از نکات مهم در ساخت تجهیزات فیزیکی مانند رباتها، دقت در هنگام طراحی و در نظر گرفتن تمامی جوانب مسأله (وزن، ابعاد، جنس، هزینه، سهولت در ساخت و ...) می باشد. لذا در این تحقیق، با در نظر گرفتن تمامی مسائل، یک طرح اولیه ایجاد شد و سپس با استفاده از نرم افزار SolidWorks و تهیه و رسم دقیق تعدادی از تجهیزات مورد نیاز مانند موتور و انکودر در آن نرم افزار، تمامی قطعات به دقت طراحی و رسم گردید.

همان گونه که در قسمت مقدمه توضیح داده شد، برای حرکت بازوی دوم آکروبات نیاز به یک محرک می باشد. بدین منظور از یک موتور جریان مستقیم ۱۲ ولت (شکل (۱)) استفاده شد. از آنجا که برای

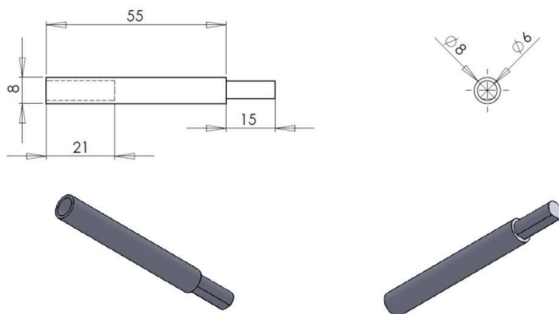


شکل (۶): نقشه بازوی اول  
Fig. (6): First link design

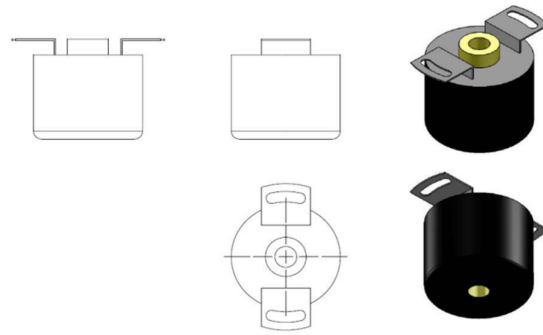


شکل (۷): نقشه وزنه تعادلی بازوی اول  
Fig (7): First link Counterweight design

از آنجا که قطر محور موتور استفاده شده دو میلیمتر کوچکتر از قطر داخلی محور توخالی انکودر بود، قطعه نشان داده شده در شکل (۸) به صورت پرسی به محور موتور متصل شد.

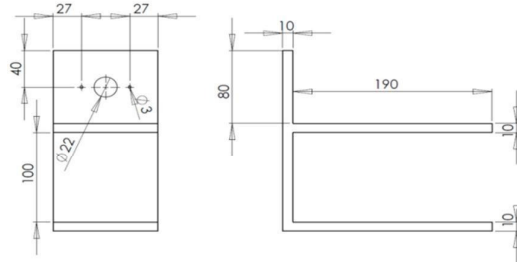


شکل (۸): نقشه رابط بین محور موتور و انکودر  
Fig. (8): Motor shaft and encoder linkage design



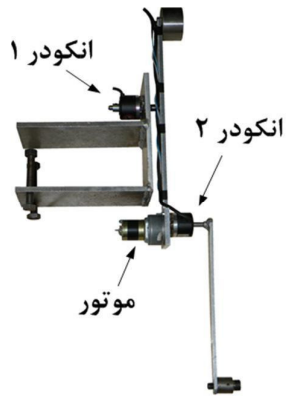
شکل (۴): طرح پیاده‌سازی شده انکودر در SolidWorks  
Fig. (4): Plotted encoder in SolidWorks

برای نگه داشتن بازوهای آکروبات یک پایه به نحوی طراحی شد که اولاً بتواند به راحتی به یک میز متصل گردد و ثانياً بازوی اول و انکودر مربوط به آن را نگه دارد. این پایه با استفاده از دو پیچ به میز متصل می‌شود و برای کاهش وزن آن از جنس آلومینیوم ساخته شد. همچنین به منظور کاهش اصطکاک بازوی اول در محل اتصال آن با پایه یک سوراخ برای قرار گرفتن بولبرینگ تعبیه شد (شکل (۵)).

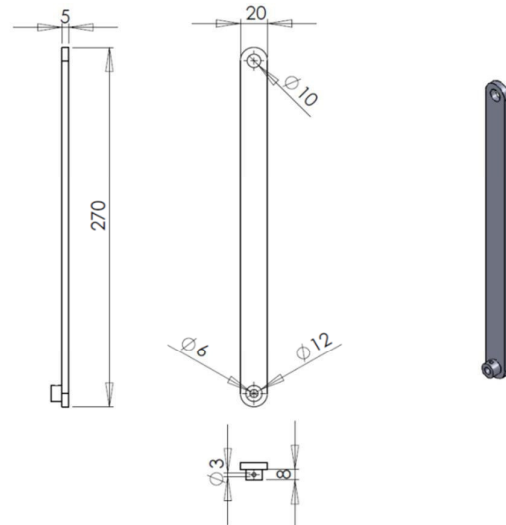


شکل (۵): نقشه پایه طراحی شده  
Fig. (5): Designed base

در مرحله بعد بازوی اول طراحی شد. برای این بازو یک محور دوران در نظر گرفته شد که پس از عبور از بولبرینگ تعبیه شده در پایه، از درون محور توخالی انکودر عبور کند. همچنین سوراخ‌های لازم برای عبور پیچ‌های نگه‌دارنده موتور و انکودر بر روی بازو تعبیه گردید. طول بازو به نحوی در نظر گرفته شده است که در هنگام دوران بازوی اول، موتور با پایه برخوردی نداشته باشد. در شکل (۶) طرح بازوی اول با جزئیات نشان داده شده است. همچنین برای جبران وزن موتور و انکودر یک وزنه (شکل (۷)) در طرف دیگر بازوی اول در نظر گرفته شد که با استفاده از یک پیچ به انتهای بازوی اول متصل می‌شود.



شکل (۱۲): سیستم آکروبات ساخته شده  
Fig. (12): Implemented Acrobot



شکل (۹): نقشه بازوی دوم  
Fig. (9): Second link design

### ۳- مدل سازی

اولین گام در راه طراحی یک سیستم کنترل مناسب، به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم کنترل شونده می باشد. برای سیستم های فیزیکی که به صورت بازوی ربات (شامل تعدادی رابط و مفصل حرکت دورانی یا خطی) می باشند معمولاً معادلات دینامیک با استفاده از دو روش زیر به دست می آیند [۹]:

شیوه اولر-لاگرانژ<sup>۲</sup>

شیوه نیوتن-اولر<sup>۳</sup>

شیوه اولر-لاگرانژ بیان می کند که معادلات حاکم بر هر سیستم فیزیکی با  $n$  درجه آزادی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

که در آن  $L=K-P$  و  $q_i$  و  $\tau_i$  به ترتیب میزان جابجایی (خطی یا دورانی) و گشتاور وارد شده به مفصل  $i$ ام،  $L$  لاگرانژین<sup>۴</sup>،  $K$  انرژی جنبشی<sup>۵</sup> و  $P$  انرژی پتانسیل<sup>۶</sup> سیستم مورد نظر است.

برای یک بازوی ربات  $n$  مفصله معادلات اولر-لاگرانژ می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$M(q)\ddot{q} + D(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (2)$$

که در آن  $M(q)$  ماتریس اینرسی و عناصر آن با استفاده از انرژی جنبشی از رابطه زیر محاسبه می شود:

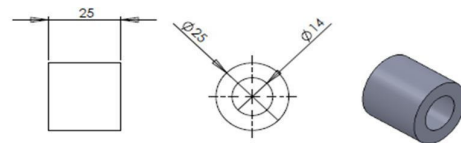
$$K = \frac{1}{2} \sum_{i,j} m_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (3)$$

همچنین  $D(q, \dot{q})$  ماتریس نیروی جانب مرکز و نیروی پیچشی می باشد که عنصر  $k$  ام آن به صورت زیر محاسبه می شود:

$$d_k = \sum_{i,j=1}^n d_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (4)$$

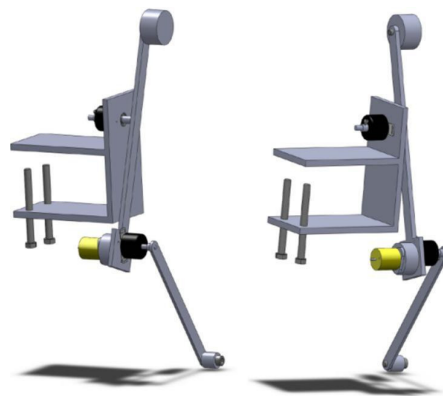
$$d_{ijk}(q) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial m_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial m_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{ij}}{\partial q_k} \right\}$$

در شکل (۹) و شکل (۱۰) طرح بازوی دوم و وزنه تعادلی مورد نیاز برای بازوی دوم نشان داده شده است. این وزنه به منظور ایجاد گشتاور لازم برای حفظ تعادل بازوی اول در نظر گرفته شده است. همچنین در انتهای بازوی دوم سوراخی جهت اتصال وزنه در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۰): نقشه وزنه تعادلی بازوی دوم  
Fig. (10): Second link Counterweight design

پس از اتمام مراحل طراحی، ساخت سیستم بر اساس نقشه انجام شد. در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) به ترتیب طرح نهایی سیستم آکروبات پس از مونتاژ قطعات طراحی شده و سیستم آکروبات ساخته شده نشان داده شده است.

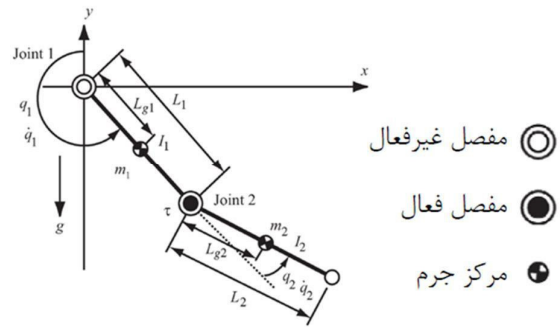


شکل (۱۱): طرح نهایی سیستم آکروبات  
Fig. (11): Final design of Acrobot

همچنین برای محاسبه  $G(q)$  داریم:

$$g_k(q) = \frac{\partial P}{\partial q_k} \quad (5)$$

برای مدلسازی آکروبات طرح شماتیک سیستم به صورت نشان داده شده در شکل (۱۳) فرض شد.



شکل (۱۳): طرح شماتیک آکروبات

Fig. (13): Schematic diagram of Acrobot

بنابراین انرژی جنبشی ناشی از حرکت خطی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{2} m_1 v_{c1}^T v_{c1} + \frac{1}{2} m_2 v_{c2}^T v_{c2} = \frac{1}{2} \dot{q}^T \{ m_1 J_{v_{c1}}^T J_{v_{c1}} + m_2 J_{v_{c2}}^T J_{v_{c2}} \} \dot{q} \quad (10)$$

برای سرعت زاویه‌ای بازوی اول و دوم نیز روابط زیر برقرار است:

$$\omega_1 = \dot{q}_1 \quad (11)$$

$$\omega_2 = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \quad (12)$$

در نتیجه، انرژی جنبشی ناشی از حرکت دورانی بدین شکل به دست می‌آید:

$$\frac{1}{2} \dot{q}^T \left\{ I_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + I_2 \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right\} \dot{q} \quad (13)$$

با استفاده از (۱۰) و (۱۳)، می‌توان ماتریس اینرسی را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$M = m_1 J_{v_{c1}}^T J_{v_{c1}} + m_2 J_{v_{c2}}^T J_{v_{c2}} + I_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + I_2 \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

با انجام مقداری محاسبات مثلثاتی، معادله (۱۴) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_1 L_{g1}^2 + I_1 + m_2 L_{g2}^2 + I_2 + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 L_{g2} \cos q_2 \\ m_{12} &= m_2 L_{g2}^2 + I_2 + m_2 L_1 L_{g2} \cos q_2 \\ m_{21} &= m_2 L_{g2}^2 + I_2 + m_2 L_1 L_{g2} \cos q_2 \\ m_{22} &= m_2 L_{g2}^2 + I_2 \end{aligned} \quad (16)$$

با استفاده از (۱۶) و (۴)، ماتریس نیروی جانب مرکز و نیروی پیچشی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$D(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 L_1 L_{g2} (2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \sin q_2 \\ m_2 L_1 L_{g2} \dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

روابط (۱۸) و (۱۹) به ترتیب انرژی پتانسیل محاسبه شده برای بازوی اول و بازوی دوم را نشان می‌دهند:

$$P_1 = m_1 g L_{g1} \cos q_1 \quad (18)$$

$$P_2 = m_2 g (L_1 \cos q_1 + L_{g2} \cos (q_1 + q_2)) \quad (19)$$

بنابراین انرژی پتانسیل کل سیستم برابر است با:

$$P = (m_1 L_{g1} + m_2 L_1) g \cos q_1 + m_2 L_{g2} g \cos (q_1 + q_2) \quad (20)$$

و ماتریس  $G(q)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G(q) = \begin{bmatrix} -(m_1 L_{g1} + m_2 L_1) g \sin q_1 - m_2 L_{g2} g \sin (q_1 + q_2) \\ -m_2 L_{g2} g \sin (q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

بدین ترتیب تمامی عناصر مورد نیاز جهت به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم آکروبات به دست آمده است. تنها مشکل این روابط تعداد بالای پارامترهای مجهول سیستم می‌باشد. می‌توان با تعریف پارامترهای  $\theta_1 \dots \theta_5$  به صورت روابط (۲۲)، پارامترهای مجهول را به ۵ پارامتر تقلیل داد:

$$(15)$$

که در آن:

$q_1$ : زاویه بازوی اول

$q_2$ : زاویه بازوی دوم

$m_1$ : جرم بازوی اول

$m_2$ : جرم بازوی دوم

$L_1$ : طول بازوی اول

$L_2$ : طول بازوی دوم

$L_{g1}$ : فاصله مفصل اول تا مرکز جرم بازوی اول

$L_{g2}$ : فاصله مفصل دوم تا مرکز جرم بازوی دوم

$I_1$ : لختی بازوی اول

$I_2$ : لختی بازوی دوم

$\tau$ : گشتاور ناشی از موتور

با فرض  $q = [q_1 \quad q_2]^T$  سرعت حرکت خطی مرکز جرم بازوی اول و بازوی دوم به ترتیب به صورت نشان داده شده در روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند:

$$v_{c1} = J_{v_{c1}} \dot{q} \quad (6)$$

$$v_{c2} = J_{v_{c2}} \dot{q} \quad (7)$$

که در آنها داریم:

$$(8)$$

$$J_{v_{c1}} = \begin{bmatrix} -L_{g1} \cos q_1 & 0 \\ -L_{g1} \sin q_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v_{c2}} = \begin{bmatrix} -L_1 \cos q_1 - L_{g2} \cos (q_1 + q_2) & -L_{g2} \cos (q_1 + q_2) \\ -L_1 \sin q_1 - L_{g2} \sin (q_1 + q_2) & -L_{g2} \sin (q_1 + q_2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3 \cos q_2 & \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 \\ \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 & \theta_2 \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} -\theta_3 (2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \sin q_2 \\ \theta_3 \dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_6 \dot{q}_1 + \theta_7 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \theta_8 \dot{q}_2 + (\theta_9 + \theta_{10} e^{-\theta_{11} |\dot{q}_2|}) \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\theta_4 \sin q_1 - \theta_5 \sin(q_1 + q_2) \\ -\theta_3 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_{12} E - \theta_{13} \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

که در آن پارامترهای  $\theta_1 \dots \theta_{13}$  ثوابتی می‌باشند که لازم است با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی محاسبه شوند.

#### ۴- برقراری ارتباط با کامپیوتر

همان گونه که در قسمت مقدمه گفته شد، هدف از این مقاله ساخت یک وسیله آزمایشگاهی است که بتوان ایده‌های کنترلی را بر روی آن پیاده‌سازی نمود. لذا باید عملیات شناسایی پارامترها، طراحی کنترل-کننده و پیاده‌سازی کنترل‌کننده توسط کامپیوتر انجام شود. بدین منظور، لازم است ارتباط بین کامپیوتر و سیستم آکروبات از طریق یک مدار واسط برقرار شود. با توجه به این که تمامی این مراحل با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد، باید مدار واسطی انتخاب شود که توسط نرم افزار متلب قابل شناسایی باشد. از این رو، در این تحقیق از کارت تبادل داده PCI-1751 استفاده شد (شکل (۱۴)). این کارت از طریق اسلات PCI به کامپیوتر متصل می‌شود و دارای ۴۸ ورودی و خروجی دیجیتال می‌باشد که می‌توانند تبادل داده را با فرکانس 1 MB/Sec انجام دهند. ولی باید توجه داشت که مزیت اصلی این کارت این است که به راحتی می‌تواند از طریق جعبه ابزار Real-Time Windows Target™ با محیط Simulink® متلب ارتباط برقرار کند. این مساله از این جنبه دارای اهمیت خاص می‌باشد که برای پیاده سازی کنترل‌کننده حتماً لازم است که شبیه‌سازی در حالت Real-Time انجام گیرد.



شکل (۱۴): کارت تبادل داده PCI-1751  
Fig. (14): PCI-1751 DAQ card

برای تغذیه موتور و انکودرها، یک مدار الکترونیکی نیاز بود که سطوح ولتاژ مورد نظر را فراهم کند. بدین منظور با استفاده از یک درایور

$$\begin{aligned} \theta_1 &= m_1 L_{g1}^2 + I_1 + m_2 L_1^2 \\ \theta_2 &= m_2 L_{g2}^2 + I_2 \\ \theta_3 &= m_2 L_1 L_{g2} \\ \theta_4 &= (m_1 L_{g1} + m_2 L_1) g \\ \theta_5 &= m_2 g L_{g2} \end{aligned} \quad (22)$$

با این فرض معادلات دینامیکی سیستم آکروبات به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} M(q) \ddot{q} + D(q, \dot{q}) + G(q) &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \\ M(q) &= \begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3 \cos q_2 & \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 \\ \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 & \theta_2 \end{bmatrix} \\ D(q, \dot{q}) &= \begin{bmatrix} -\theta_3 (2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \sin q_2 \\ \theta_3 \dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix} \\ G(q) &= \begin{bmatrix} -\theta_4 \sin q_1 - \theta_5 \sin(q_1 + q_2) \\ -\theta_3 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

این معادلات حرکت بازوها را در وضعیت ایده‌آل و زمانی که هیچ گونه اصطکاکی وجود ندارد مدل می‌کنند. برای تکمیل و واقعی‌تر نمودن این مدل لازم است ترم اصطکاک نیز به معادلات اضافه شود. مدل-سازی اصطکاک در مفصل اول بعلت اینکه این مفصل غیر فعال است و از طریق یک بولبرینگ به پایه دستگاه متصل شده است ساده‌تر از مفصل دوم می‌باشد. بازوی دوم از طریق یک موتور گیربکس‌دار به بازوی اول متصل شده است، این مساله مقدار اصطکاک مفصل دوم را به مراتب بیشتر و غیر خطی‌تر می‌کند. برای مدل‌سازی این نوع اصطکاک لازم است ترمی در نظر گرفته شود تا در سرعت‌های کم اصطکاک بالا را از خود نشان دهد. از این رو، اصطکاک دو مفصل، به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۰] و [۱۱]:

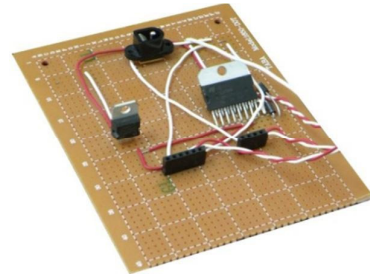
$$F = \begin{bmatrix} \theta_6 \dot{q}_1 + \theta_7 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \theta_8 \dot{q}_2 + (\theta_9 + \theta_{10} e^{-\theta_{11} |\dot{q}_2|}) \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} \quad (24)$$

که در آن پارامترهای ثابت می‌باشند. گشتاور اعمال شده در مفصل دوم ناشی از یک موتور DC می‌باشد. لذا لازم است رابطه بین گشتاور تولید شده در موتور و ولتاژ ورودی به آن تعیین گردد. با توجه به اینکه، مدل موتورهای DC شامل دو قطب الکتریکی و مکانیکی می‌باشند و پاسخ ناشی از قطب الکتریکی بسیار سریع است، می‌توان نشان داد که با صرف‌نظر کردن از قطب ناشی از مدار الکتریکی، این رابطه به صورت زیر بدست می‌آید:

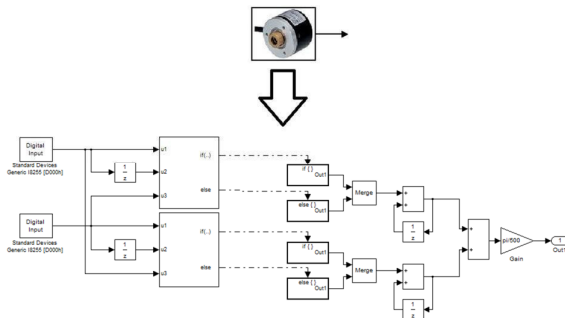
$$\tau = \theta_{12} E - \theta_{13} \dot{q}_2 \quad (25)$$

که در آن  $\theta_{12}$  و  $\theta_{13}$  دو ثابت و  $E$  ولتاژ اعمال شده به موتور می‌باشند. بنابراین نهایتاً با ترکیب روابط (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) مدل سیستم آکروبات به صورت زیر به دست می‌آید:

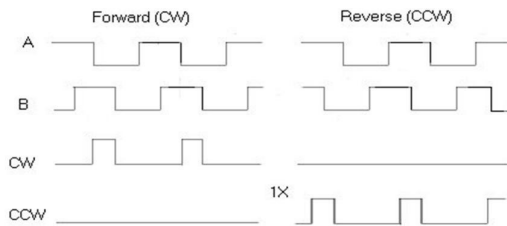
موتور (آی سی L298) و یک رگولاتور ۵ ولت (آی سی 7805) یک مدار ساده طراحی شد (شکل ۱۵)



شکل (۱۵): مدار تغذیه و درایور موتور  
Fig. (15): Source and driver circuit



شکل (۱۷): زیر سیستم تشخیص زاویه انکودر  
Fig. (17): Encoder angle counting subsystem



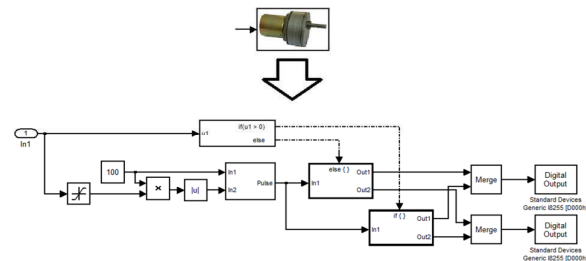
شکل (۱۸): نحوه تشخیص جهت حرکت محور انکودر  
Fig. (18): Direction of encoder rotation

در نهایت برای درک بهتر شیوه ارتباطی کامپیوتر و آکروبات می توان این ارتباط را از طریق دیاگرام نشان داده شده در شکل (۱۹) تشریح کرد. در واقع به هنگام شناسایی یا کنترل ابتدا ما مدل ایجاد شده در محیط  $\text{Simulink}^{\text{®}}$  را کامپایل<sup>۸</sup> می کنیم. سپس مدل کامپایل شده را اجرا می کنیم. این مدل دائما در هر زمان نمونه برداری از طریق کارت تبادل داده اطلاعاتی را به آکروبات می فرستد و از آن دریافت می کند. اطلاعات فرستاده شده، سیگنال PWM مورد نیاز جهت کنترل موتور می باشد. این سیگنال برای تقویت از سطح سیگنال ۵V با جریان کمتر به ۱۲V با جریان بیشتر به مدار درایور و از طریق آن به موتور فرستاده می شود. به طور همزمان تغییری در زوایای بازوها ایجاد شده و پالس هایی در انکودرها تولید می گردد. پالس های تولید شده نیز از طریق کارت PCI-1751 به مدل کامپایل شده فرستاده می شوند. در آنجا بر اساس الگوریتم کنترلی تصمیم گرفته می شود که تغییری در گشتاور موتور ایجاد شود. لذا باز هم سیگنالی به سمت موتور فرستاده می شود و چرخه تا پایان شبیه سازی به همین ترتیب به صورت زمان واقعی<sup>۹</sup> ادامه پیدا می کند.

#### ۵- پاسخ سیستم

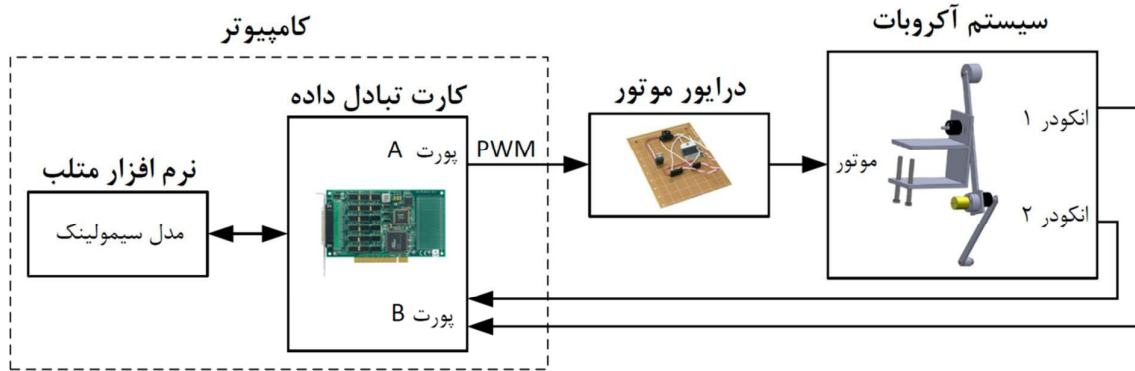
برای بررسی نحوه عملکرد سیستم ساخته شده، مکانیزم آکروبات از طریق کارت تبادل داده PCI-1751 به یک کامپیوتر با پردازنده Intel Core-i3 و حافظه 4GB DDR3 متصل گردید. مشخصات به صورتی انتخاب شد که کامپیوتر قابلیت خواندن داده های موجود در بافر کارت تبادل داده را در زمان مناسب داشته باشد و سیستم به راحتی بتواند به صورت زمان واقعی عمل کند.

درایور موتور DC استفاده شده، نمی تواند یک سیگنال DC پیوسته تولید کند. بلکه تنها می تواند یک ولتاژ DC را قطع یا وصل نماید. لذا برای تولید یک سطح ولتاژ متغیر می توان یک سیگنال PWM به عنوان ورودی به این آی سی اعمال نمود. برای این کار یک زیر سیستم مولد پالس PWM در محیط Simulink ایجاد شد (شکل (۱۶)). این زیر سیستم یک سیگنال ورودی در بازه  $[-1, 1]$  را دریافت می کند و سیگنال PWM مورد نظر را تولید کرده و به پایه های مورد نظر کارت PCI می فرستد.



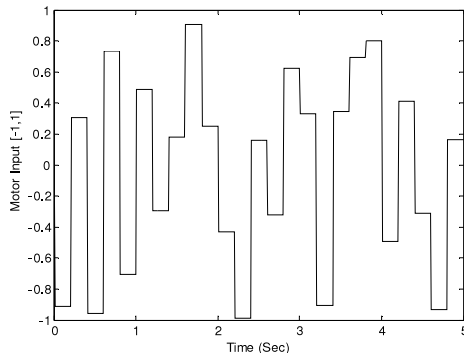
شکل (۱۶): زیر سیستم تولید پالس PWM  
Fig. (16): PWM generator subsystem

انکودر استفاده شده در این تحقیق از نوع افزایشی<sup>۷</sup> می باشد. بدین معنی که به جای اندازه گیری زاویه به صورت مطلق، میزان دوران نسبت به موقعیت اولیه را با تولید پالس نشان می دهد. بنابراین با شمردن این پالس ها می توان به مقدار زاویه دوران دست یافت. در این تحقیق، بر مبنای اصول کاری انکودر یک زیر سیستم جهت تشخیص زاویه مفاصل در محیط  $\text{Simulink}^{\text{®}}$  طراحی شد (شکل (۱۷)). بدین ترتیب که اگر یک لبه پایین رونده در A تشخیص داده شود و ورودی B یک باشد، یک واحد به شمارنده پالس اضافه می شود. و اگر یک لبه پایین رونده در B تشخیص داده شود و ورودی A یک باشد، یک واحد از شمارنده پالس کاسته می شود (شکل (۱۸)).



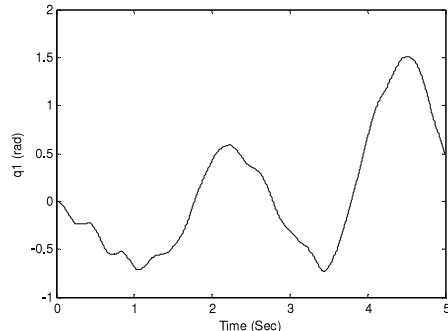
شکل (۱۹): دیاگرام ارتباطی کامپیوتر و سیستم آکروبات

Fig. (19): Interface diagram of computer and Acrobot system



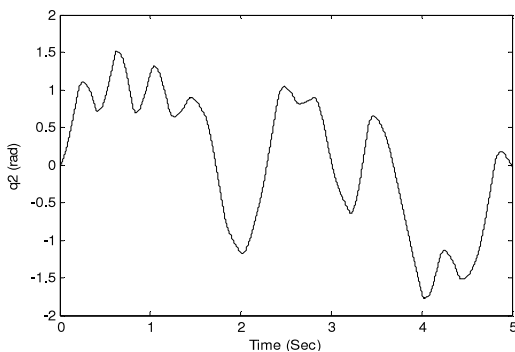
شکل (۲۰): ورودی تصادفی اعمال شده به موتور

Fig. (20): Applied random signal to the motor



شکل (۲۱): زاویه بازوی اول

Fig. (21): The first link angle



شکل (۲۲): زاویه بازوی دوم

Fig. (22): The second link angle

همان گونه که در شکل (۱۹) مشاهده می شود سیستم آکروبات دارای ۱ ورودی (ولتاژ موتور) و ۲ خروجی (زاویه بازوی اول و زاویه بازوی دوم) می باشد. جهت اتصال کارت تبادل داده به ورودی موتور، پورت A کارت به صورت خروجی تنظیم گردید و همچنین برای اتصال انکودر ۱ و ۲ به کارت، پورت B به صورت ورودی تنظیم شد. ورودی موتور در واقع یک سیگنال PWM است که پس از تولید توسط بلوک مربوطه (شکل (۱۶)) به پورت A کارت تبادل داده فرستاده می شود.

باید توجه داشت از آنجا که ولتاژ نامی موتور جریان مستقیم استفاده شده در این تحقیق ۱۲ ولت می باشد، لازم است آی سی درایور موتور نیز با یک منبع تغذیه ۱۲ ولت تغذیه شود. بدین ترتیب پس از قطع و وصل ولتاژ توسط درایور، ولتاژی بین ۰ تا ۱۲ ولت حاصل می شود که به راحتی می تواند گشتاور موتور را کنترل نماید.

برای بررسی نحوه رفتار سیستم حلقه باز، یک ورودی تصادفی به سیستم اعمال شد و زوایای بازوی اول و دوم اندازه گیری گردید. شکل (۲۰) ورودی تصادفی اعمال شده به موتور و شکل (۲۱) و (۲۲) به ترتیب زاویه بازوی اول و دوم را در پاسخ به ورودی تصادفی نشان می دهد.

به علت غیرخطی بودن رفتار سیستم و تداخل شدید بین جابجایی دو بازو پیش بینی تأثیر پارامترهای سیستم بر روی پاسخ حلقه باز کار مشکلی می باشد. ولی به اطمینان می توان گفت که هر چه طول بازوی اول ( $L_1$ )، جرم بازوی دوم ( $m_2$ )، اینرسی بازوی دوم ( $I_2$ ) یا فاصله مرکز جرم بازوی دوم ( $L_{g2}$ ) بیشتر باشد تأثیر حرکت بازوی دوم بر گشتاور اعمال شده به بازوی اول بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر سیستم این امکان را خواهد داشت که در مدت زمان کمتری خود را به وضعیت تعادل ناپایدار نزدیک کند. ولی در این صورت لازم است موتور نیز به منظور جابجایی بازوی دوم گشتاور بیشتری اعمال نماید.



## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک وسیله آزمایشگاهی از دسته سیستم‌های Underactuated طراحی و ساخته شد. برای طراحی از نرم افزار SolidWorks® استفاده شد و پس از ساخت مکانیزم مورد نظر، مدل دینامیکی سیستم به منظور طراحی کنترل کننده به دست آمد. ویژگی سیستم ساخته شده این است که با بکارگیری یک کارت تبادل داده مناسب (PCI-1751) امکان برقراری ارتباط آن با ابزارهای توانمند نرم‌افزار MATLAB® به وجود آمده است. به طوری که تمامی مراحل شناسایی پارامترها و طراحی کنترل کننده می‌توانند درون محیط Simulink متلب پیاده‌سازی شود و اجرای هر ایده کنترلی جدید تنها با تغییر نرم‌افزاری مدل ایجاد شده در Simulink امکان پذیر است.

## سیاسگذاری

این مقاله حاصل از نتایج طرح پژوهشی با عنوان "طراحی، مدل سازی، شبیه سازی و ساخت یک بازوی روبات آکروبات همراه با سیستم کنترلی آن" می باشد که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان انجام شده است.

## پی‌نوشت:

- 1- Data Acquisition Card
- 2- Euler-Lagrange Method
- 3- Newton-Euler Method
- 4- Larangian
- 5- Kinetic Energy
- 6- Potential Energy
- 7- Incremental Encoder
- 8- Compile
- 9- Real-Time

## References

- [1] K.D. Do, J. Pan, "Control of ships and underwater vehicles: Design for underactuated and nonlinear marine systems", p. 2, London: Springer-Verlag, 2009.
- [2] L. Birglen, T. Lalibert, C. Gosselin, "Underactuated robotic hands", p. 1, Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [3] M. Mariappan, Sh.M.M. Jan, M. Iftikhar, "A novel approach for classification of underactuated mechanism in myoelectric hand", American Journal of Biomedical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 35-40, 2011.
- [4] R. N. Banavar, V. Sankaranarayanan, "Switched finite time control of a class of underactuated systems", p.5, Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [5] A. Rodriguez, R. P. Metzger, O. Cifdaloz, T. Dhirasakdanon, "Description of a modeling, simulation, animation, and real-time control (MoSART) environment for a class of electromechanical systems", IEEE Trans. on Education, Vol. 48, No. 3, pp. 359-374, 2005.
- [6] J. Liu and R.G. Landers, "Modular control laboratory system with integrated simulation, animation, emulation, and experimental components", International Journal of Engineering Education, Vol. 21, No. 6, pp. 1005-1016, 2005.
- [7] M.W. Dunnigan, "Enhancing state-space control teaching with a computer-based assignment", IEEE Trans. on Education, Vol. 44, No. 2, pp. 129-136, 2001.
- [8] X.Z. Lai, J.H. She, S.X. Yang, M. Wu, "Comprehensive unified control strategy for underactuated two-link manipulators", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, Vol. 39, No. 2, pp. 389-398, April 2009.
- [9] M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, "Robot modelling and control", p. 188, New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [10] S. Cong, G. Li, X. Feng, "Parameters identification of nonlinear DC motor model using compound evolution algorithms", Proceedings of the World Congress on Engineering, June 30 - July 2, London, 2010.
- [11] S. Cong, A. De Carli, "Two advanced control strategies for dynamic friction compensation", Acta Automatic Sinica, Vol. 24, No. 2, pp. 236-240, 1998.

