تحلیل و طراحی یک زبان خاص‌منظوره برای توصیف ساختار و حرکت لینکیج‌ها

علی نوراله و نوشین بهزادپور

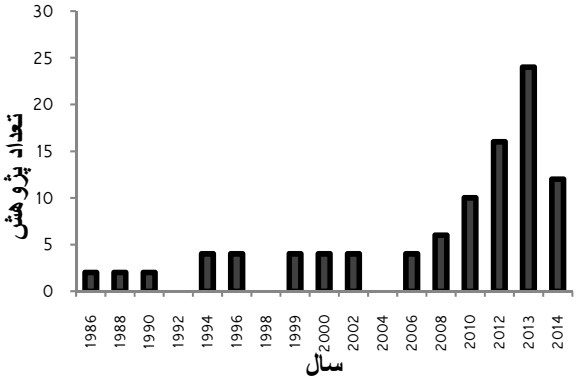
چکیده: این مقاله در حوزه ساختار لینکیج‌ها و حرکت آنها تدوین شده است. لینکیج مجموعه‌ای از پاره‌خطهایی است که از دو انتهایشان قابل اتصال به یکدیگر می‌باشند و کاربردهای فراوانی در مدل‌کردن بازوهای روبات دارند. تاکنون زبان خاص‌منظوره‌ای که تنها مختص لینکیج باشد، طراحی و یا گزارش نشده است. زبان‌های خاص‌منظوره نرم‌افزارهایی هستند که بالارفتن سطح تجرید، قابلیت درک بهتر، تسریع روند توسعه و نیاز به تلاش کمتر برای یادگیری دانش مربوطه از امتیازاتی است که فراهم می‌آورند. بنابراین مانند همه نرم‌افزارها مراحل تحلیل، طراحی، پیاده‌سازی، تست، نگهداری و پشتیبانی دارند. در این مقاله به طراحی یک زبان خاص‌منظوره برای بیان ساختار و حرکت لینکیج‌ها پرداخته می‌شود و سپس تحلیلی بر روی این زبان انجام خواهد شد. با استفاده از زبان خاص‌منظوره تعریف‌شده در این مقاله، محدودیتی در تعریف لینکیج‌های ساده از نظر تعداد وجود نخواهد داشت. همچنین با تعریف ماژول‌های حرکتی و ترکیب متوالی و موازی آنها حرکت نهایی لینکیج‌ها تولید می‌شود و با استفاده از امکانات زبان ارائه‌شده شرط‌های مورد نیاز برای شروع یا خاتمه هر یک از حرکت‌های نهایی تعریف می‌شود. به کارگیری این نوع نگرش در مدل‌سازی خاص‌منظوره، علاوه بر آن که موجب سهولت در تعریف ساختار لینکیج‌ها و تنوع در چگونگی تعریف اولیه آنها است، این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان هماهنگی و همکاری چندین روبات برای انجام یک وظیفه واحد را توصیف و در مرحله بعد پیاده‌سازی نمود.

کلیدواژه: **حرکت لینکیج زنجیره‌باز، زبان خاص‌منظوره، لینکیج زنجیره‌باز، مدل‌سازی خاص‌منظوره.**

۱- مقدمه

حرکت، پدیده‌ای است که در جهان فیزیک در طی زمان معنادار می‌شود [۱]. در دنیای واقعی، بازوی روبات در انجام کارهای دقیق، تکراری، سخت یا غیر ممکن و خطرناک برای بشر مانند کارکردهای پزشکی و عملیات نظامی یا امداد کاربرد دارد. در مسایل وابسته به حرکت که متحرک به طور پیوسته در حال حرکت است، لازم است تا وضعیت اجزای آن در هر زمان با مؤلفه‌هایی تعریف شود.

اجزای متحرک در طی زمان حرکت با یکدیگر تعامل دارند و اثرهایی از خود برجا می‌گذارند و یا اثرهایی می‌پذیرند و در نتیجه منجر به تغییر پارامترهای جسم متحرک می‌شوند. بنابراین یک نمونه مناسب برای



شکل ۱: نمودار فراوانی مطالعات انجام‌شده در حوزه زبان‌های خاص‌منظوره در حرکت روبات [۴].

حرکت باید بتواند این نیازهای اولیه را به روش مناسبی برآورده کند. مدل‌سازی خاص‌منظوره یک فرایند عملیاتی- بیانی است و خاص‌منظوره بودن، به معنای متمرکزبودن بر یک دامنه کاری خاص و در نتیجه در نظر گرفته شدن برای رسیدگی به یک هدف مشخص است [۲]. این تعاریف دو مشخصه اساسی این نوع مدل‌سازی را برجسته می‌کند. توان بیانگر آنها که یک حوزه خاص را مورد هدف قرار می‌دهد و تعریف مفاهیم رسمی که برای متخصصان حوزه قابل درک باشد، در حالی که قابل پردازش بوده و مدل‌های قابل اجرایی از برنامه‌های کاربردی آن حوزه را ارائه کنند [۳]. طراحی، شبیه‌سازی و برنامه‌نویسی سیستم‌های روباتی تخصصی است که با چالش‌های فراوانی روبه‌رو بوده است به دلیل آن که تخصص از چندین حوزه باید از نظر مفهومی و فنی یکپارچه شود. مدل‌سازی خاص‌منظوره برای توسعه برنامه‌های کاربردی روباتیک یک مفهوم کارامد و انعطاف‌پذیراست. استفاده از این نوع مدل‌سازی در زمینه روباتیک باعث بالابردن سطح انتزاع در این حوزه می‌شود و از این طریق چالش‌های طراحی، شبیه‌سازی و برنامه‌نویسی سیستم‌های روباتی را کاهش داده و موجب یادگیری راحت‌تر اصطلاحات مربوط به این دامنه می‌شود [۴]. علاوه بر آن فاصله بین مدل‌سازی و پیاده‌سازی را نیز کاهش می‌دهد و همچنین امکان افزایش سطح تجرید را از طریق استفاده از مفاهیم خاصی فراهم می‌کند [۴]. استفاده از زبان‌های خاص‌منظوره[1] در حوزه حرکت روبات‌ها تقریباً متداول است. این مسأله در سال‌های اخیر که ابزارهای تولید و طراحی زبان‌های خاص‌منظوره پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۱).

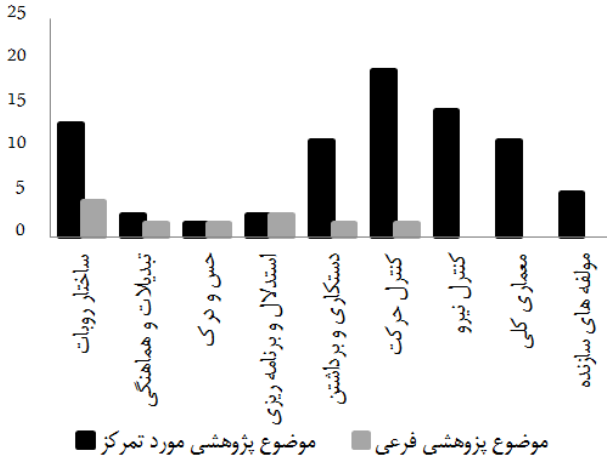
لینکیج به مجموعه‌ای از لینک‌ها و مفصل‌ها گفته می‌شود که معادل با یک گراف همبند بوده و برای مدل‌کردن بازوی روبات به کار می‌رود. با استفاده از برخی قابلیت‌های زبان‌های خاص‌منظوره موجود و ترکیب آنها

این مقاله در تاریخ ۲۹ دی ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

علی نوراله، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، (email: nourollah@aut.ac.ir).

نوشین بهزادپور، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، (email: nooshin.behzadpour@sru.ac.ir).

1. Domain Specific Languages



شکل ۲: توزیع مطالعات انجام‌شده در حوزه‌های گوناگون مدل‌سازی خاص‌منظوره [۸].

با امکانات زبان‌های همه‌منظوره، می‌توان لینکیج‌ها و حرکت آنها را توصیف نمود. با این حال نمی‌توان از آنها به عنوان یک زبان خاص‌منظوره برای بیان حرکت لینکیج‌ها نام برد زیرا همچنان با برخی دشواری‌های زبان‌های همه‌منظوره[1] و عدم انتزاع ساختار روبات درگیر خواهیم بود، به عبارت دیگر زبان خاص‌منظوره‌ای که تنها مختص لینکیج باشد، طراحی یا گزارش نشده است.

تاریخچه استفاده از ساختارهای متنی برای بیان حرکات به قبل از ابداع زبان‌های خاص‌منظوره و روش‌های نمادگذاری رقص، باز می‌گردد. در روش‌های مبتنی بر این رویکرد حرکات با نمادهای ابداعی جایگزین می‌شد. شیوه نمادگذاری حرکات «Benesh» توسط رادولفبنش[2] در طی سال‌های ۱۹۵۵ تا ۱۹۸۰ برای بیان رقص ابداع شد و توسعه یافت [۵]. روش «Labanotation» توسط رادولف لابان[3] و توسعه‌یافته توسط آن هاتچینسون[4]، در سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۸۷ برای توصیف و تحلیل حرکات انسان تکامل یافت [۶]. نمادگذاری حرکات «Eshkol-Walchman» توسط نوآ اشکل[5] و آبراهام واکمن[6] در سال ۱۹۵۸ برای بیان حرکات عام‌تر انسان معرفی گردید [۷]. استفاده از زبان‌های خاص‌منظوره در به کارگیری چالش‌های مربوط به حرکت روبات‌های صنعتی و متحرک در ۹ دسته کلی قرار می‌گیرد. این دسته‌بندی بر اساس مفاهیم و انتزاعات مربوط، صورت گرفته است. دسته اول، ساختارهای روباتی هستند. این دسته‌بندی به مدل‌سازی اجزای روبات بسته به پلتفرم آن مانند روبات‌های متحرک، صنعتی و چرخدار و المان‌های آن مانند قطعات انعطاف‌پذیر و مفصل‌های چرخشی می‌پردازد. به عبارت دیگر ساختار روبات‌ها در دسته اول مطالعات انجام شده است. تبدیلات و چگونگی انجام محاسبات ریاضی که برای هماهنگی بین بخش‌های روبات و محیط برای توانمندسازی محاسبه موقعیت، شتاب، سرعت و نیروی روبات مورد نیاز است، دسته دوم پژوهش‌های انجام‌شده را دربرمی‌گیرد. نیاز به قابلیت‌های حس و درک محیط و به عبارت دیگر چگونگی تعامل روبات با محیط برای انجام وظایف در نظر گرفته شده دسته سوم و قابلیت استدلال خودکار برای تشخیص عملکرد درست و بازشناسایی اشیا توسط روبات دسته چهارم پژوهش‌های مدل‌سازی خاص حوزه را دربرمی‌گیرد. برنامه‌ریزی حرکت روبات برای قابلیت‌های دست‌کاری، برداشتن، گرفتن اشیا و جایگذاری آنها نیز موضوع پژوهشی دیگری است که به آن پرداخته شده است. دسته ششم پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مدل‌سازی خاص‌منظوره، مربوط به قابلیت‌های کنترل حرکت پیشرفته برای تطابق با عدم قطعیت در محیط و برآوردن محدودیت‌ها و شرایط حرکتی است. همچنین قابلیت‌های کنترل نیرو و برآوردن محدودیت‌های مربوط به آن دسته هفتم پژوهش‌های مدل‌سازی خاص‌منظوره را دربرمی‌گیرد. معماری و برنامه‌نویسی سیستم‌های روباتی دو جنبه دیگر از مدل‌سازی خاص‌منظوره را برآورده می‌کند. این موضوع از یک سو بر روی یکپارچه‌سازی قابلیت‌های ارائه‌شده در یک معماری کلی تمرکز دارد و از سوی دیگر بر در نظر گرفتن قابلیت‌های ارائه‌شده در قالب مؤلفه‌های سازنده برای بازاستفاده از آنها تأکید دارد. شکل ۲ نمودار توزیع مطالعات انجام‌شده در حوزه‌های گوناگون مدل‌سازی خاص‌منظوره روبات‌ها را نشان می‌دهد.

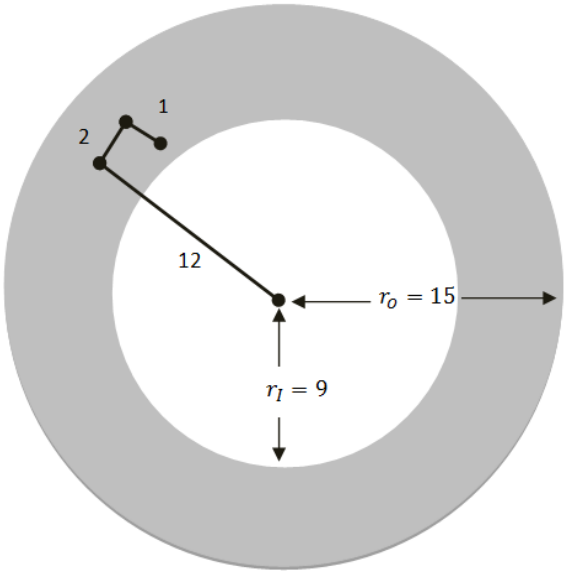
هدف این پژوهش، ارائه زبانی است که با استفاده از آن بتوان ساختار لینکیج‌ها و حرکت آن را با سهولت و سرعت بیشتر و با هزینه و تخصص کمتری بیان کرد. با استفاده از زبان خاص‌منظوره پیشنهادی در این مقاله، می‌توان ساختار چندین لینکیج را به طور هم‌زمان و حرکت‌های متنوع آنها را توصیف کرد. ساختار مقاله به این شرح است: در بخش دوم به تعاریف اولیه پژوهش پرداخته می‌شود. تحلیل و طراحی زبان خاص‌منظوره پیشنهادی در بخش سوم مطرح می‌شود. بخش چهارم به نمونه برنامه‌های کاربردی از زبان خاص‌منظوره می‌پردازد. بخش پنجم به مقایسه زبان خاص‌منظوره پیشنهادی با مقایسه زبان‌های خاص‌منظوره روباتی می‌پردازد و کاستی‌های پژوهش بیان می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آینده پژوهش مطرح می‌گردد.

۲- تعاریف اولیه

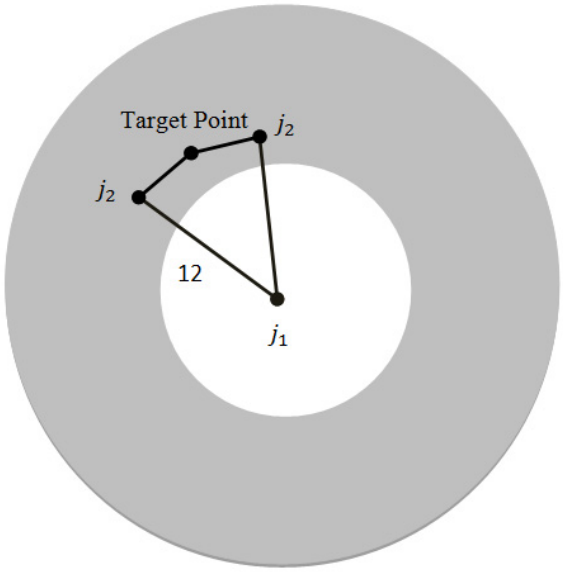
هر لینکیج، مجموعه‌ای از لینک‌ها و مفصل‌هاست که به طور عمومی معادل با یک گراف همبند است. رأس‌های این گراف نماینده مفصل و یال‌های آن نماینده اجسام صلبی است که لینک نامیده می‌شود. مفاصل قابلیت چرخش دارند. در این گراف طول لینک‌ها و زوایایی که مفاصل از طریق اتصال لینک‌ها با یکدیگر می‌سازند اهمیت دارد، همچنین ضخامت لینک‌ها صفر در نظر گرفته شده تا در عمل، لینکیج‌ها سطح مناسبی از انتزاع برای مدل‌کردن بازوی روبات را فراهم آورند [۹]. همان طور که گراف انواع متفاوتی دارد، نحوه اتصال لینک‌ها و مفاصل با یکدیگر منجر به تعریف مدل‌های متفاوتی از بازوی روبات خواهد شد. لینکیج زنجیره‌باز که به آن چندضلعی کمانی، بازو و خط‌کش نیز گفته می‌شود[7]، لینکیجی است که در آن فقط یک مسیر بین هر دو مفصل دلخواه وجود دارد. از مسایل مربوط به هندسه لینکیج‌ها، مسأله دسترسی‌پذیری است. نسخه تصمیم‌گیری این مسأله به این صورت است که آیا یک نقطه مشخص از یک لینکیج (معمولاً نقطه پایانی آن) می‌تواند به نقطه‌ای در فضای دکارتی که لینکیج در آن قرار دارد (نقطه مقصد) دسترسی یابد یا خیر [۹]. یک لینکیج زنجیره‌باز که به صورت $\langle l_1, l_2, \ldots, l_{n-1} \rangle$ نمایش داده می‌شود دنباله‌ای از $n-1$ لینک متصل به یکدیگر است که l_i نمایانگر طول یال‌های گراف مورد بحث بوده و یک عدد حقیقی ثابت مثبت است.

فضای دسترسی‌پذیری لینکیج زنجیره‌باز ناحیه‌ای است بین دو دایره

1. General Purpose Languages
2. Rudolf Benesh
3. Rudolf Laban
4. Ann Hutchinson
5. Noa Eshkol
6. Abraham Wachman
7. OpenChain, Arc, Arm, Ruler



شکل ۳: ناحیه دسترسی‌پذیری با شعاع خارجی $r_O = ۱۵$ و شعاع داخلی $r_I = ۹$. تمامی ناحیه طوسی‌رنگ فضای دسترسی‌پذیر بازو است.



شکل ۴: پیکربندی‌های ممکن یک لینکیج زنجیره باز برای دسترسی به نقطه هدف.

متحدالمرکز به مرکز مفصل اول زنجیره‌باز که شعاع خارجی آن از (۱) به دست می‌آید

$$r_O = \sum_{i=1}^{n-1} l_i \qquad (۱)$$

اگر طول بزرگ‌ترین لینک با l_m نمایش داده شود شعاع داخلی لینکیج از (۲) حاصل می‌شود

$$r_I = 2l_m - r_O \qquad (۲)$$

همچنین اگر $r_I \leq 0$ باشد، فضای دسترسی‌پذیری دایره‌ای به شعاع r_O است (شکل ۳) [۱۰].

یک وضعیت خاص از لینکیج (در یک لحظه) که در آن موقعیت کامل هر نقطه از لینکیج را بتوان تعیین نمود، پیکربندی[1] نام دارد و مجموعه تمامی پیکربندی‌های ممکن فضای پیکربندی[2] را تشکیل می‌دهد. مسأله

جدول ۱: نمادها در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی.

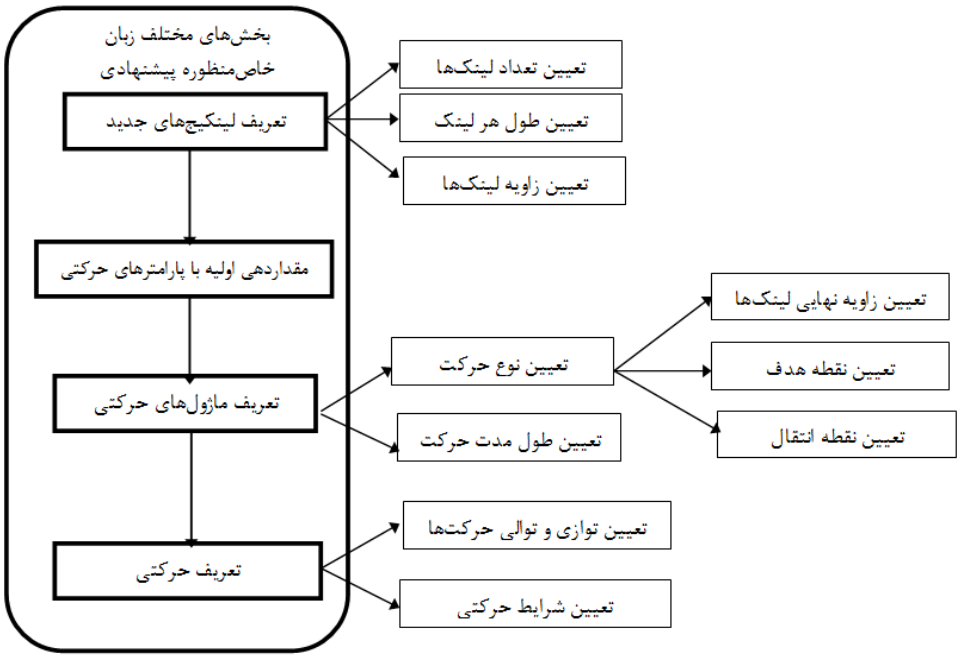
نمادها	غیر پایانه‌ها
،	⟨ Comma ⟩
)	⟨ LeftP ⟩
(	⟨ RightP ⟩
]	⟨ LeftQ ⟩
[	⟨ RightQ ⟩
{	⟨ LeftA ⟩
}	⟨ RightA ⟩
.	⟨ Dot ⟩
؛	⟨ Semicolon ⟩
..	⟨ Delimiter ⟩
:=	⟨ Assignment ⟩
<> | <= | >= | < | >	⟨ Relation ⟩
λ	⟨ Lambda ⟩
؟	⟨ Undefined ⟩
‘	⟨ SingleCotation ⟩
+	⟨ Plus ⟩
_	⟨ Subtract ⟩
*	⟨ Multiply ⟩
/	⟨ Div ⟩

پیکربندی مجدد لینکیج از دیگر مسایل مهم مربوط به لینکیج‌ها در هندسه محاسباتی است. در این مسأله که با پاسخ مثبت مسأله دسترسی‌پذیری برای ورودی داده‌شده، معنادار می‌شود، باید به طور صریح مسیر حرکت لینکیج مشخص شود و پیکربندی مجدد بازوی روبات به‌دست آید [۹]. شکل ۴ دو نوع پیکربندی ممکن برای یک لینکیج زنجیره‌باز با دو لینک برای دسترسی به نقطه مقصد را نمایش می‌دهد. به عبارت دیگر مسأله پیکربندی مجدد به تعیین وضعیت جدید لینک‌ها و مفصل‌های لینکیج برای قرارگیری نقطه انتهایی لینکیج در نقطه مقصد تعیین‌شده می‌پردازد. ورودی‌های مسأله پیکربندی مجدد، وضعیت فعلی لینک‌ها و مفصل‌های لینکیج (که یک پیکربندی خوانده می‌شود) و نقطه مقصد می‌باشد و خروجی این مسأله یک پیکربندی جدید از لینکیج است.

۳- زبان خاص‌منظوره پیشنهادی

زبان خاص‌منظوره پیشنهادی برای مدل‌سازی اجزا و حرکت‌های دورانی[3]، تبدیلی[4] و همین طور پیکربندی مجدد لینکیج‌های زنجیره باز در در فضای دوبعدی طراحی شده است. زبان پیشنهادی دارای چهار بخش است. بخش اول زبان ارائه‌شده به توصیف لینکیج‌ها و اجزای آنها می‌پردازد. بخش دوم زبان خاص‌منظوره پیشنهادی برای مقداردهی اولیه پارامترها در نظر گرفته شده است. در بخش سوم ماژول‌های حرکتی تعریف شده و بخش چهارم با ترکیب ماژول‌ها و تعریف شروط مختلف به توصیف حرکت نهایی مورد بحث می‌پردازد. شکل ۵ شمای توصیف حرکت در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی را نمایش می‌دهد. همچنین نمادهای تعریف‌شده در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی در جدول ۱ نشان داده شده است.

1. Configuration
2. Configuration Space
3. Rotation
4. Translation



شکل ۵: شمای کلی زبان خاص‌منظوره پیشنهادی.

```
<Program>          ::=<Head><ProgramBody><End>
<Head>             ::=LINKAGEPROGRAM<ProgName>
<ProgName>         ::=<Identifier><Semicolon>
<ProgramBody>      ::=<Specification><Initialization><Modules><MainBody>
<End>              ::=END<Dot>
<Specification>    ::=SPECIFICATION<SpecBody>
<SpecBody>         ::=<SpecItem><Semicolon><SpecBody>|<SpecItem>
<SpecItem>         ::=<Array><InitPart><Semicolon>
<Array>            ::=<ArrayName><Range>
<ArrayName>        ::=<Identifier>
<Range>            ::=<Lambda>|<LeftQ><LowRange><Delimiter><HighRange>
                   <RightQ>
<LowRange>         ::=<Integer>
<HighRange>        ::=<Integer>
<InitPart>         ::=<Lambda>|<Assignment><ArrayElement>
<ArrayElement>     ::=<Element>|<Array>|<Element><Comma><ArrayElement>|
                   <Array><Comma><ArrayElement>
<Element>          ::=<LeftP><ElementPart><RightP>
<ElementPart>      ::=<ElementName><Property><Comma><Property>
<ElementName>      ::=<Identifier><Comma>|<Lambda>
<Property>         ::=<Number>|<Undefined>
```

شکل ۶: فرم BNF گرامر تعریف لینکیج در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی.

در بخش ۳-۱ ساختار لینکیج‌ها در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی و در بخش ۳-۲ حرکت لینکیج‌ها در این زبان شرح داده شده است.

۳-۱ ساختار لینکیج‌ها

برنامه در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی با کلمه کلیدی LINKAGEPROGRAM آغاز می‌شود. دو قسمت ابتدایی این زبان برای توصیف ساختار لینکیج‌ها و اجزای آن می‌باشد. قسمت سوم و قسمت چهارم این زبان برای توصیف حرکت لینکیج‌ها به کار می‌رود. قسمت اول زبان خاص‌منظوره پیشنهادی 〈Specification〉 است. این قسمت با کلمه کلیدی SPECIFICATION آغاز می‌شود. بدنه هر 〈Specification〉 که با 〈SpecBody〉 تعریف می‌شود، از یک یا تعدادی 〈SpecItem〉 تشکیل شده که به وسیله نماد 〈Semicolon〉 از یکدیگر جدا می‌شوند. از جنبه‌های نوآوری زبان خاص‌منظوره ارائه‌شده در قدرت و انعطاف زبان ارائه‌شده برای تعریف لینکیج‌ها است. بر این اساس، یک لینکیج آرایه‌ای از لینک‌هاست که با نام و بازه تعریف می‌شود. بازه برای این آرایه اختیاری است. بنابراین برای تعریف لینکیج از ساختار آرایه‌ای به دو صورت می‌توان استفاده نمود. اگر تعداد لینک‌های بازوی مشخص باشد، از همان ابتدا به عنوان پارامتر ورودی به آن داده می‌شود و در غیر این صورت ابعاد آرایه به صورت نامعلوم تعریف شده تا در ادامه حرکت و در صورت لزوم مشخص می‌گردد. به عبارت دیگر تعداد لینک‌های ساختار آرایه‌ای به دو صورت دینامیک و ایستا قابل تعریف است. همچنین ساختار 〈Array〉 به گونه‌ای تعریف شده که در هنگام تعریف یک لینکیج، علاوه بر آن که امکان تعریف لینک‌های جدید برای آن وجود دارد، می‌توان از بخشی یا تمامی لینک‌های لینکیج‌های تعریف‌شده در آن بهره برد. برای تعریف لینک‌های 〈Array〉 از 〈Element〉 استفاده می‌شود. پارامترهای توصیف‌کننده 〈Element〉 شناسه (اختیاری) طول و اندازه زاویه (نسبی یا مطلق) است. دسترسی به یک لینک در آرایه‌ای از لینک‌ها از طریق اندیس و همین طور شناسه، امکان‌پذیر است. شکل ۶ فرم BNF گرامر تعریف لینکیج در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی را نمایش می‌دهد. قسمت دوم زبان خاص‌منظوره

```
<Initialization>  ::=INITIALIZATION<InitialBody>
<InitialBody>     ::=<InitalItem>|<InitialItem><Semicolon><InitialBody>
<InitialItem>     ::=<InitialKind><Dot><Characteristics>
                  <Assignment><SCotation><ReturnType><SCotation>
<InitialKind>     ::=<Partial><SemiPartial><Total>
<Partial>         ::=<ArrayName>
<Total>           ::=<Subject><LeftP><ArrayName><RightP>
<SetArray>        ::=<ArrayName><Comma><SetArray>|<ArrayName>
<Subject>         ::=LINKAGES| ALLLINKAGES| <String>
<Characteristics  ::=ANGLEMODE| ANGLERANGE| ANGLEDEFAULT| ORIGIN|
                  ANCHORD|STARTPOINT|UNITLENGTH|<String>
<ReturnType>      ::=Absolute|Relative|Degree|Radian|cm|mm
                  <Point>|<String>|<BooleanValue>
<Point>           ::=<LeftP><Integer><Comma><Integer><RightP>
<BooleanValue>    ::=True|False
```

شکل ۷: فرم BNF گرامر تعریف ⟨Initialization⟩.

جدول ۲: پارامترهای مقداردهی بخش ⟨INITIALIZATION⟩.

پارامتر تعیین‌شونده	توصیف‌کننده	نوع مقدار تعیین‌کننده
ANGLEMODE	مرجع زاویه توصیف (مطلق یا نسبی)	Absolute Relative
ANGLERANGE	محدوده زاویه حرکتی لینک‌های لینکیج	⟨Integer⟩
ANGLEDEFAULT	واحد زاویه لینک‌ها (رادیان یا درجه)	Degree Radian
UNITLENGTH	واحد طول	Cm mm
ORIGIN	نقطه مرجع	⟨Point⟩
STARTPOINT	نقطه شروع لینکیج	⟨Point⟩
ANCHORD	بسته‌بودن/ نبودن لینکیج در یک نقطه مشخص	True False

مورد بحث ⟨Initialization⟩ است. این قسمت با کلمه کلیدی INITIALIZATION آغاز می‌شود. بخش ⟨Initialization⟩ که از ⟨InitialBody⟩ تشکیل شده است شامل یک یا بیشتر ⟨InitialItem⟩ است که به وسیله ⟨Semicolon⟩ از یکدیگر جدا شده‌اند. در این قسمت پارامترهای توصیف‌کننده یک لینکیج در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی، مقداردهی می‌شوند. این مقداردهی اولیه به سه صورت انجام می‌گیرد. مقداردهی که منحصراً بر روی یک لینکیج انجام شود با ⟨Partial⟩ مشخص می‌شود. اگر بر روی تعدادی از لینکیج‌ها انجام شود با ⟨SemiPartial⟩ توصیف می‌گردد و اگر بر روی همه لینکیج‌ها اعمال شود با ⟨Total⟩ بیان می‌شود. شکل ۷ فرم BNF گرامر تعریف ⟨Initialization⟩ در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

جدول ۲ پارامترهایی که در بخش ⟨Initialization⟩ مقداردهی می‌شوند را به همراه انواع مناسب مقداردهی آنها نمایش می‌دهد.

۳-۲ حرکت لینکیج‌ها

دو بخش بعدی زبان خاص‌منظوره پیشنهادی برای توصیف حرکت لینکیج است. بخش سوم زبان خاص‌منظوره پیشنهادی ⟨Modules⟩ است که با کلمه کلیدی MODULES آغاز می‌شود به تعریف ماژول‌های حرکتی می‌پردازد. بخش ⟨Modules⟩ که از ⟨ModuleBody⟩ تشکیل شده است شامل یک یا بیشتر ⟨ModuleItem⟩ است که به وسیله ⟨SemiColon⟩ از یکدیگر جدا شده‌اند.

جنبه نوآوری دیگر زبان طراحی‌شده، امکان تعریف چنین ماژول‌هایی است. هر ⟨ModuleItem⟩ از دو بخش ⟨Header⟩ و ⟨Body⟩ تشکیل شده است. بخش ⟨Header⟩ شامل شناسه و نماد شروع‌کننده یک ماژول PROC است. بخش بدنه شامل سه نوع عبارت شرطی، غیر شرطی و حلقه است.

عبارت غیر شرطی ⟨MotionStatement⟩ که مختص این زبان خاص‌منظوره می‌باشد، شامل سه عبارت است. عبارت غیر شرطی ⟨Rotate⟩ برای دوران لینکیج از یک لینک مشخص است و با پارامترهای لینکیج، لینک مبدأ دوران، زاویه دوران، زمان شروع و زمان پایان انجام دوران توصیف می‌شود. عبارت غیر شرطی ⟨Translate⟩ برای انتقال یک لینکیج از یک نقطه مشخص به یک نقطه دیگر است و با پارامترهای لینکیج، نقطه مقصد، زمان شروع و زمان پایان انجام انتقال توصیف می‌شود. عبارت غیر شرطی ⟨Reach⟩ برای دسترسی نقطه انتهایی لینکیج در نقطه هدف است و با لینکیج، نقطه هدف، زمان شروع و زمان پایان حرکت توصیف می‌شود. عبارت غیر شرطی ⟨ReNew⟩ برای تغییر طول لینک‌ها به کار می‌رود و با لینکیج و لینک تغییرکننده، عملیات ریاضی تغییر طول، زمان شروع و زمان پایان عمل تغییر طول توصیف می‌گردد. زمان شروع و زمان پایان با یک عدد و واحد زمانی تعریف می‌شود. این واحدهای زمانی با یکی از کلمات کلیدی Second یا Minute مشخص می‌گردد.

عبارت ⟨Print⟩ برای چاپ متن و پیغام بر روی صفحه نمایش به کار می‌رود. در جدول ۳ پارامترهای توصیف‌کننده عبارت‌های حرکتی در زبان خاص‌منظوره و توضیحات آنها آمده است. هر یک از این پارامترها به وسیله ⟨Comma⟩ از یکدیگر جدا شده‌اند.

عبارت‌های شرطی با ⟨CondStatement⟩ تعریف می‌شوند و ساختاری مشابه عبارت‌های شرطی در زبان ALGOL دارند. عبارت‌های حلقه که با کلمه کلیدی Do آغاز می‌شوند، ترکیبی از یک یا چند عبارت شرطی و غیر شرطی هستند که به وسیله ⟨SemiColon⟩ از یکدیگر جدا شده‌اند. شرط خروج از حلقه که با کلمه کلیدی ExitWhen آغاز می‌شود، با یک عبارت شرطی ساده ⟨SimpleBoolean⟩ مشخص می‌گردد. خروج از یک حلقه با کلمه کلیدی EndDo مشخص می‌شود. شکل ۸ فرم BNF گرامر تعریف ماژول در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

```
<Modules>              ::=MODULES<ModuleBody>
<ModuleBody>           ::=<ModuleItem><SemiColon><ModuleBody>|<ModuleItem>
<ModuleItem>           ::=<Header><Body><RightA>
<Header>               ::=<ProcedureName><LeftA>
<ProcedureName>        ::=PROC<ProcName>
<Identifier>           ::=<ProcName>
<Body>                 ::=<UncondStatement>|<CondStatement>|<LoopStatement>
<UncondStatement>      ::=<MotionStatement>|<Print>|<Expression>
<MotionStatement>      ::=<Rotate>|<Translate>|<Reach>|<ReNew>
<Rotate>               ::=Rotate<LeftP><Rotation><RightP>
<Rotation>             ::=<ArrayName><LeftQ><ElementIndex><RightQ><Comma><AngleRotate><Time>
<AngleRotate>          ::=<Integer>
<Translate>            ::=Translation<LeftP><Translation><RightP>
<Translation>          ::=<ArrayName><Comma><XCoord><Comma><YCoord><Time>
<XCoord>               ::=<SignedInteger>
<YCoord>               ::=<SignedInteger>
<ElementIndex>         ::=<ElementName>|<Integer>
<Reconfiguration>      ::=Reach<LeftP><Reach><RightP>
<Reach>                ::=<ArrayName><Comma><Point><Comma><Mode><Time>
<Mode>                 ::=<Optimal>|<SetOfElement>
<SetOfElement>         ::=<ElementName><Comma><SetOfElement>|<ElementName>
<ReNew>                ::=ReNew<LeftP><Update><RightP>
<Update>               ::=<ArrayName><LefttQ><ElementName><RightQ>Inway<Operation>
<Operation>            ::=<Operator><Integer>
<Operator>             ::=<Plus>|<Subtract>|<Multiply>|<Div>
<Print>                ::=Print<LefttP><String><RightP>
<StartTime>            ::=<Comma>FROM<Integer>
<EndTime>              ::=<Comma>WHILE<Integer>
<TimeUnit>             ::=Second|Minute
<CondStatement>        ::=IfStatement>|<IfStatement>Else<UncondStatement>
<IfStatement>          ::=<IfClause><UncondStatement>
<IfClause>             ::=If<BooleanExpression>
<BooleanExpression>    ::=<SimpleBoolean>Then|<IfClause>Then<SimpleBoolean>Else<BooleanExpression>
<SimpleBoolean>        ::=<LeftPart><RelationPart><RightPart>
<RelationPart>         ::=<Relation>|<Assignment>
<BooleanValue>         ::=False|True
<LeftPart>             ::=<Variable>|<Value>
<LoopStatement>        ::=Do<CompoundStatement>ExitWhen<SimpleBoolean>EndDo
<CompoundStatement>    ::=<UncondStatement><SemiColon><CompoundStatement>|
                       <CondStatement><SemiColon><CompoundStatement>|<UncondStatement>|
                       <CondStatement>
```

شکل ۸: فرم BNF گرامر تعریف ماژول.

جدول ۳: پارامترهای توصیف‌کننده عبارت‌های حرکتی در زبان خاص‌منظوره.

پارامترهای توصیف‌کننده	Rotate	Translate	Reach	ReNew
شناسه	یک لینک مشخص در یک لینکیج مشخص دوران می‌کند و از لینک دوران‌کننده تا نقطه انتهایی لینکیج را به حرکت درمی‌آورد.	تمامی اجزای یک لینکیج مشخص حرکت می‌کنند.	لینک انتهایی در یک لینکیج مشخص بر روی نقطه مقصد قرار می‌گیرد و برای قرارگیری آن، اعضای لازم حرکت می‌کنند.	لینک مشخص در یک لینکیج مشخص تغییر طول می‌دهد و باعث تغییر مختصات لینک مشخص تا انتهای لینکیج می‌شود.
پارامتر عملیاتی	زاویه دوران که با یک عدد مشخص می‌شود.	نقطه انتقال که با دو عدد معادل با یک نقطه مشخص می‌شود.	نقطه مقصد که با دو عدد معادل با یک نقطه مشخص می‌شود.	عملیات تغییر طولی لینک که با عملگرهای ضرب، تقسیم، تفریق، جمع و یک عدد مشخص می‌شود.
عدد (اختیاری)	زمان دوران که با دو عدد مشخص می‌شود.	زمان انتقال که با یک عدد مشخص می‌شود.	زمان پیکربندی مجدد که با دو عدد مشخص می‌شود.	زمان تغییر طولی لینک که با دو عدد مشخص می‌شود.

قسمت آخر زبان خاص‌منظوره پیشنهادی 〈MAINBODY〉 است. این قسمت که با کلمه کلیدی MAINBODY آغاز می‌شود از ترکیب ماژول‌های تعریف‌شده در بخش ماژول به ساخت و تعریف حرکت می‌پردازد که با 〈Movements〉 تعریف می‌گردد. هر 〈Movements〉 از یک یا چند 〈MovementItem〉 تشکیل شده است که به وسیله 〈SemiColon〉 از یکدیگر جدا شده‌اند. اجرای هر یک با کلمه کلیدی RUN مشخص می‌گردد و با این ترکیب حرکت نهایی لینکیج ساخته می‌شود. هر 〈MovementItem〉 شامل ۳ عبارت است. هر 〈SimpleMovement〉 که برای تعریف حرکت‌های ساده مورد استفاده قرار می‌گیرد در بدنه زبان خاص‌منظوره به سه صورت 〈Pure〉، 〈Duration〉 و 〈Repetition〉 تعریف یک ماژول به همان صورت که در بخش ماژول تعریف شده است اجرا می‌گردد. هر 〈Pure〉 را می‌توان یک 〈Duration〉 قلمداد کرد که زمان شروع و زمان پایان حرکت به آن افزوده شده است. یک 〈Repetition〉 نیز یک 〈Pure〉 است که به آن تعداد دفعات اجرا و زمان‌های تأخیر بین هر یک از دفعات اجرا اضافه شده است. تعداد دفعات اجرا با کلمه کلیدی TIMES و زمان تأخیر بین هر یک با کلمه کلیدی DELAY مشخص می‌شود و با 〈Comma〉 از یکدیگر جدا می‌شوند. هر 〈CompoundMovement〉 که برای تعریف حرکت‌های ترکیبی به کار می‌رود مجموعه‌ای از دو یا بیش از دو 〈SimpleMovement〉 است

```
<MainBody>          ::=MAINBODY<Movements>
<Movements>         ::=<MovementItem>|<Movements><Semicolon><MovementItem>
<MovementItem>      ::=<SimpleMovement>|<CompoundMovement>|<ParallelMovement>
<SimpleMovement>    ::=<Pure>|<Duration>|<Repetition>
<Pure>              ::=RUN<ProcName><Definition>
<Duration>          ::=<Pure><Time>
<Repetition>        ::=<Pure><Integer>TIMES<Comma>DELAY<Integer><TimeUnit>
<Definition>        ::=<RightP><MovementName><LeftP>|<Lambda>
<MovementName>      ::=<Identifier>
<CompoundMovement>  ::=Do<SetSimpleMovement>EndDo
<SetSimpleMovement> ::=<SimpleMovement>|<SimpleMovement><Semicolon><SetSimpleMovement>
<ParallelMovement>  ::=PARBEGIN<Definition><CheckCondition><SetSimpleMovement><Semicolon>
                    PAREND<CheckCondition>|PARBEGIN<Definition><CheckCondition><Pure>
                    <Semicolon><ParallelMovement>PAREND<CheckCondition>|PARBEGIN
                    <Definition><CheckCondition><SetSimpleMovement><Semicolon>
                    <ParallelMovement>PAREND<CheckCondition>|PARBEGIN<Definition>
                    <CheckCondition><Pure><Semicolon>PAREND<CheckCondition>
<CheckCondition>    ::=CONDITION<SetCondition>
<SeCondition>       ::=<CompoundCondition>|<LeftP><CompoundCondition>
                    <LogicOperator><SetCondition><RightP>
<CompoundCondition> ::=<SingleCondition>|<SingleCondition><LogicOperator>
                    <CompoundCondition>
<SingleCondition>   ::=<Not><Status><MovementName>
<Not>               ::=NOT|<Lambda>
<Status>            ::=Start|End
<Logicoperator>     ::=And|Or
```

شکل ۹: فرم BNF گرامر تعریف بدنه.

```
1  LINKAGEPROGRAM Test1;
2  SPECIFICATION//specification section
3          A[1..5]:= {
4              (?,?),
5              (?,?),
6              (x,5,90),
7              (10,135),
8              (5,45)
9          } ;
10         L1:= {
11             (x,25,110),
12             (z,27,65)
13         } ;
14         L2:= {
15             A[3..4],
16             L1,
17             (s,5,155),
18             (5,135)
19         } ;
20 INITIALIZATION//initialization section
21         L1.ANGLEMODE ='Absolute';
22         L2.ANGLEMODE ='Relative';
23         A.ANGLEMODE ='Absolute';
24         L1.ANCHORED ='Yes';
25         L1.STARTPOINT =(2,44);
26         ALLLINKAGES.ANGLEDEFAULT='Degree';
27         ALLLINKAGES.ORIGIN = (0,0);
28         ALLLINKAGES.UNITLENGTH = 'cm';
29         LINKAGES(A,L2).ANGLEDEFAULT = Rdian';
30         LINKAGES(A,L2).STARTPOINT = (0,0);
```

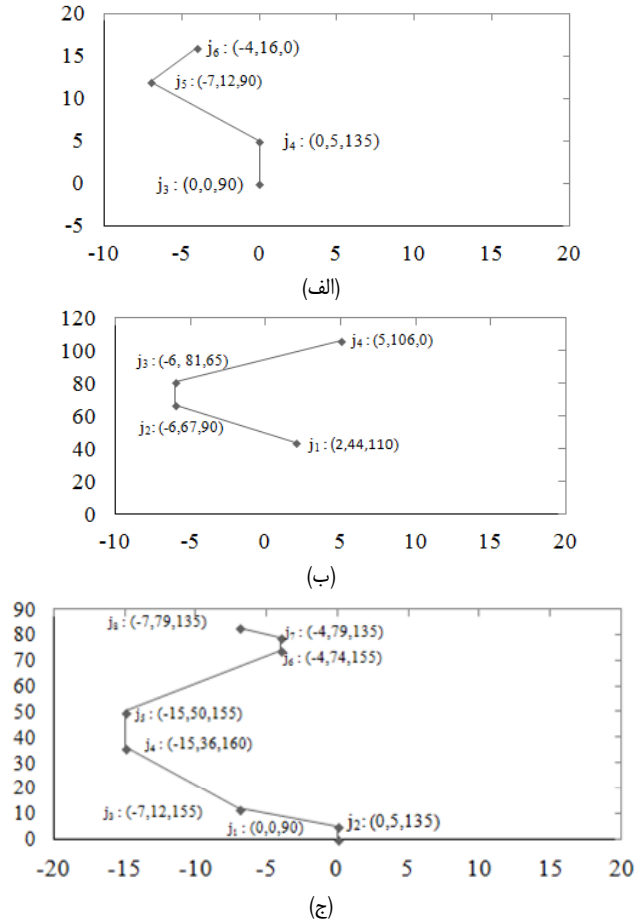
شکل ۱۰: نمونه برنامه توصیف ساختار لینکیج به همراه مقداردهی اولیه.

که بین کلمات کلیدی Do و EndDo قرار دارند و با ⟨SemiColon⟩ از یکدیگر جدا می‌شوند. هر ⟨ParallelMovement⟩ که برای تعریف حرکت‌های موازی به کار می‌رود و بین کلمات کلیدی PARBEGIN و PAREND می‌آید، ترکیب یک یا چندین ⟨SimpleMovement⟩ است که برای شروع و خاتمه هر یک به صورت اختیاری، شروطی در نظر گرفته می‌شود. این شروط که با ⟨CheckCondition⟩ تعریف می‌گردد با کلمه کلیدی CONDITION مشخص می‌شود و ترکیب منطقی چند شرط ساده است. شروط ساده مورد بحث به وسیله کلمات کلیدی And و Or با یکدیگر ترکیب می‌شوند. با این ترکیب‌های منطقی تمام یا شروع‌شدن هر جزء از ⟨MovementItem⟩ها بررسی می‌شود که با کلمات کلیدی Start و End مشخص شده است. در زبان خاص‌منظوره پیشنهادی از کلمه کلیدی END و ⟨Dot⟩ برای مشخص‌شدن انتهای برنامه استفاده شده است. در شکل ۹ فرم BNF گرامر تعریف بدنه آورده شده است.

٤- نمونه برنامه توصیف ساختار لینکیج و حرکت آن

در این بخش نمونه برنامه‌هایی از زبان خاص‌منظوره پیشنهادی مطرح می‌شود و نتایج حاصل از پیاده‌سازی بخشی از نمونه اجرایی آن که انجام گرفته است نمایش داده می‌شود. در شکل ۱۰ نمونه برنامه تعریف لینکیج‌ها و مقداردهی اولیه پارامترهای مربوط به آنها آمده است. در این شکل، لینکیج A از پنج لینک تشکیل شده که دو لینک اول آن مقداردهی نشده‌اند. این لینکیج به زمین متصل است و بنابراین حرکت تبدیلی نخواهد داشت. همچنین مرجع اندازه‌گیری زاویه آن، مطلق می‌باشد. علاوه بر آن واحد اندازه‌گیری زاویه برای آن درجه می‌باشد. لینکیج $L1$ از ۳ لینک تشکیل شده و به زمین متصل نیست. مرجع اندازه‌گیری زاویه آن، مطلق می‌باشد. لینک‌های تشکیل‌دهنده لینکیج $L2$ شامل دو لینکیج قبلی و یک لینک جدید است. این لینکیج به زمین متصل است و مرجع اندازه‌گیری زاویه آن نسبی می‌باشد. این لینکیج به زمین متصل نیست. مرجع اندازه‌گیری زاویه آن، مطلق می‌باشد. در شکل ۱۱ نمای هندسی لینکیج‌های تعریف‌شده در نمونه برنامه آمده است.

در شکل ۱۲ نمونه برنامه ماژول آمده است. حرکت‌های تعریف‌شده در بخش ماژول، مجموعه‌ای از حرکت‌های دورانی برای لینکیج $L2$ است. همین طور اضافه‌کردن طول لینک چهارم لینکیج A به اندازه دو واحد است. همچنین لینکیج $L2$ باید حرکت نماید تا مجری نهایی از واحد زمانی یکتا واحد زمانی شش در نقطه مقصد (۱۴،۳۷-) قرار گیرد. ماژول تعریف‌شده بعدی مربوط به حرکت لینکیج $L1$ است که مجری نهایی باید به تناوب در نقطه مقصد (۱۷،۳۵) قرار گیرد تا زمانی که کاربر سیستم روباتی کلیدی مانند SPACE را فشار می‌دهد. در تعریف بدنه، ماژول $F9$ با افزودن زمان اجرا به آن SimpleStatement۱ را منجر می‌شود.



شکل ۱۱: لینکیج‌های تعریف‌شده در نمونه برنامه، (الف) لینکیج $L1$، (ب) لینکیج A و (ج) لینکیج $L2$.

```
MODULES //modules section
   PROC F1 {
   Rotate(L2[4],45); /* rotates link2 and
         the other links tailed while θ4 reaches to 450 */
   } ;
   PROC F2 {
         Rotate(L2[3],90); /* rotates link3 and
    the other links tailed while θ3 reaches to 900 */
    } ;
    PROC F3 {
         Rotate(L2[1],180); /* rotates link1 and
         the other links tailed while θ1 reaches to 180◦ */
    } ;
    PROC F4 {
        Rotate(L2[5],45); /* rotates link5 and
         the other links tailed while θ5 reaches to 45◦ */
    } ;
    PROC F5 {
        Rotate(L2[6],90); /* rotates link6 and
         the other links tailed while _6 reaches to 90◦ */
    } ;
    PROC F6 {
        Translate(L1,+30,-3);/* translates whole of the
          free linkage into (+30,-3)*/
    } ;
    PROC F7 {
       Tag:=Reach (L2,-14,37 FROM 1 second,WHILE 6 second);
          If Tag = False Then
              Print "Reachability is not possible";
    } ;
    PROC F8 {
                Reach(L1,17,35);
                Print "press enter to continue:";
                c:=GETKEY;
                Exit When c=ESCAPE;
          End Do
    } ;
    PROC F9 {
Renew(A[4] Inway + 2);/* add length link 2 */
    } ;
```

شکل ۱۲: نمونه برنامه تعریف ماژول زمانی.

```
MAINBODY//body section
  //simple statement 1
       RUN F9 ,From 1 Second,While 6 Second;
 //simple statement 2
      RUN F1 10 TIMES, DELAY2 second;
Do//begin compound statement 1
      RUN F1,From 2 Second,While 5 Second;
      RUN F2 ,From 1 Second,While 10 Second;
      RUN F3 ,From 3 Second,While 12 Second;
      RUN F4 ,From5 Second,While 8 Second;
      RUN F5 ,From 1 Second,While 10 Second;
End Do;//end compound statement 1
         PARBEGIN//begin parallel statement 5
      RUN F9;//simple statement 5-1
         PARBEGIN//begin parallel statement 5-2
              RUN F2;//simple statement 5-2-1
              RUN F3;//simple statement 5-2-2
              RUN F5;//simple statement 5-2-2
         PAREND//end parallel statement 5-2
         PARBEGIN//begin parallel statement 5-3
              RUN F1(m2);//simple statement 5-3-1
              RUN F2(m1);//simple statement 5-3-2
              RUN F4(m3);//simple statement 5-3-3
         PAREND//end parallel statement 5-3
         CONDITION(End m1 Or(End m2 And Not End m3))
         /* hint: parallel statement 5-3
         terminates when its end condition satisfy.*/
PAREND//end parallel statement 5
PARBEGIN//begin parallel statement 6
      RUN F3(k2);//simple statement 6-1
          PARBEGIN(k1)//begin parallel statement 6-2
              RUN F1;//simple statement 6-2-1
              RUN F5;//simple statement 6-2-2
          PAREND//end parallel statement 6-2
          PARBEGIN//begin parallel statement 6-3
          CONDITION(Not End m3 Or(Start k2 ))
              RUN F2;
              RUN F5;
              RUN F9;
          PAREND//end parallel statement 6-3
PAREND//end parallel statement 6
 //simple statement 3
      RUN F7;
END.//End of Linkage Program
```

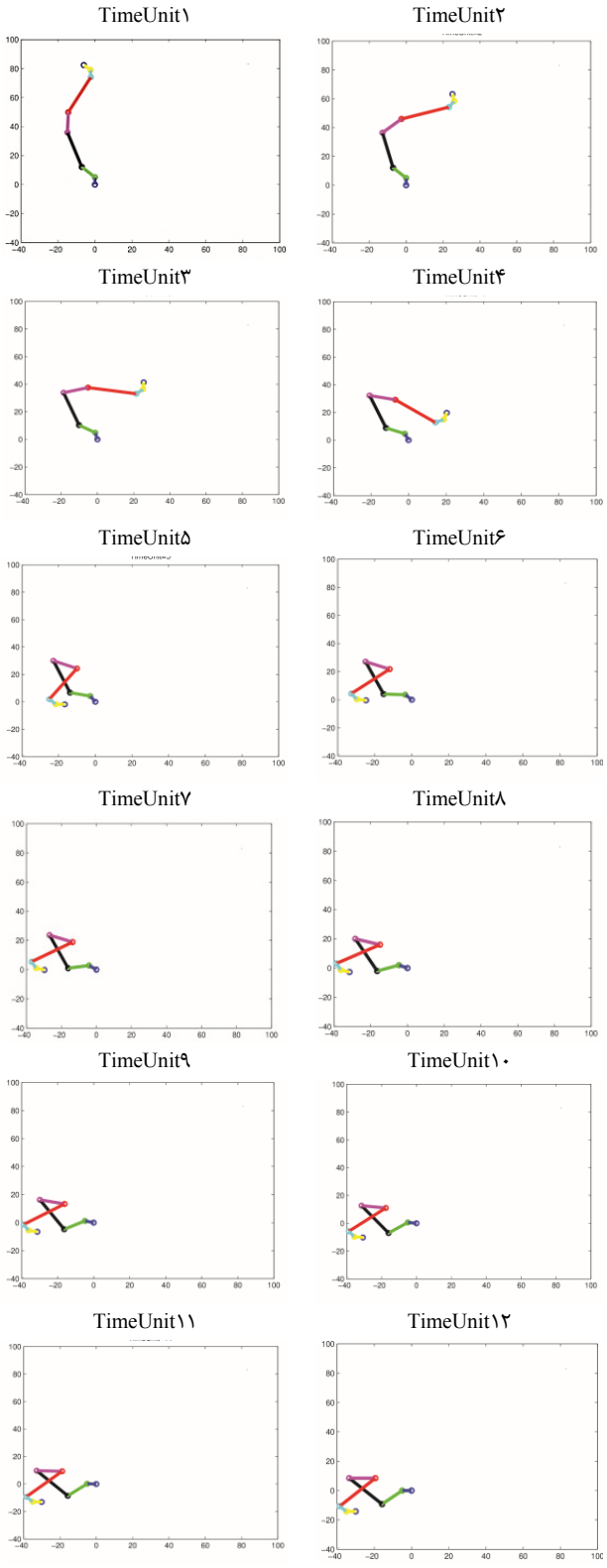
شکل ۱۳: نمونه برنامه تعریف بدنه.

همین طور ماژول $F1$ با اجرای ده مرتبه و تأخیر دو ثانیه بین هر بار اجرا SimpleStatement۲ را تعریف می‌نماید. اجرای ماژول‌های $F1, F2, F3, F4, F5$ در طی زمان‌های مشخص‌شده با Compound Statement1 مشخص می‌شود. ترکیب‌های سری و موازی ماژول‌ها به همراه شروط در نظر گرفته شده، ParallelStatement۵ و ParallelStatement۶ و در انتها اجرای ماژول SimpleStatement۳ $F7$ را تعریف می‌نماید.

در شکل ۱۳ نمونه برنامه تعریف بدنه آورده شده و همچنین شکل ۱۴ مراحل اجرای CompoundStatement۱ را نشان می‌دهد.

۵- مقایسه و کاستی‌ها

امروزه روبات‌ها در حوزه وسیعی از صنعت به کار گرفته می‌شوند. لینکیج‌ها کاربردهای فراوانی در مدل‌کردن بازوی روبات دارند و بنابراین توصیف لینکیج‌ها و حرکت آنها در حیطه علم روباتیک و مهندسی نرم‌افزار اهمیت می‌یابد و باید بتوان به طور تخصصی‌تر به آن پرداخت. زبان‌های همه‌منظوره نیمی از قابلیت‌های خود را به نفع پاسخ‌گویی به تمام برنامه‌ها از دست می‌دهند و بنابراین در حوزه حرکت روبات‌ها نیاز به وجود یک زبان سطح بالاتر و اختصاصی‌تر وجود دارد. تاکنون زبان‌های خاص‌منظوره و چارچوب‌های متعددی طراحی شده‌اند که به کاربران سیستم روبات یا مکان توصیف روبات‌ها و حرکت آنها را می‌دهد. با این حال طبق بررسی‌های انجام‌شده زبان خاص‌منظوره‌ای که به طور خاص برای توصیف لینکیج‌ها و حرکت آنها باشد وجود ندارد. با این حال این پژوهش



شکل ۱۴: حرکت در واحدهای زمانی Compound Statement۱.

مانند هر ایده جدیدی دارای کاستی‌ها و نواقصی است که در این قسمت به آنها اشاره می‌شود:

۱) زبان‌های خاص‌منظوره روباتی معروف به دلیل تعداد کاربران زیاد و پشتیبانی توسط شرکت‌ها و افراد معتبر، تقریباً فاقد ابهام و کاستی‌های جدی در نحو و معماری زبان هستند. زبان خاص‌منظوره پیشنهادی پس از طی مراحل پیاده‌سازی و تست قابل استفاده کاربران سیستم روباتی می‌شود.

۲) رمز ماندگاری زبان‌های خاص‌منظوره، علاوه بر سادگی و سهولت، مستندسازی و ارائه آن در جوامع هدف می‌باشد. بنابراین برای این که زبان خاص‌منظوره پیشنهادی به یک زبان واقعی تبدیل شود، باید نحو آن مستندسازی شده و در دسترس قرار گیرد. زبان خاص‌منظوره پیشنهادی در حال حاضر فقط یک نمونه اولیه است.

در جدول ۴ زبان خاص‌منظوره پیشنهادی بر اساس موارد در نظر گرفته‌شده، با کارهای مشابه مقایسه شده است.

٦- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک زبان خاص‌منظوره برای توصیف لینکیج‌های زنجیره‌باز و حرکت آنها معرفی گردید. قدرت و انعطاف زبان معرفی‌شده در بخش توصیف لینکیج‌ها در ارائه ساختاری است که با استفاده از آن می‌توان با سهولت بیشتری به تعریف لینکیج‌هایی با تعداد لینک‌های بالا اقدام نمود. این نوع لینکیج‌ها در مدل‌سازی روبات‌های ماری‌شکل کاربرد دارند. علاوه بر آن می‌توان ساختار لینکیج را به گونه‌ای تعریف نمود که در هنگام حرکت، تعداد لینک‌های آن کم و زیاد گردد. در عین حال زبان خاص‌منظوره پیشنهادی به نحوی طراحی شده که لینک‌ها انعطاف‌پذیر بوده و طول آنها در هنگام حرکت مشخص شود. این نوع تعریف لینکیج در محیط‌هایی که به دلیل محدودیت فضا روبات قادر به استفاده از تمامی لینک‌های خود نیست کاربرد دارد. نوآوری‌های به کار رفته در بخش توصیف حرکت لینکیج‌ها در تعریف ماژول و به کارگیری و ترکیب‌های ممکن آنها برای تولید حرکت نهایی لینکیج‌های تعریف‌شده می‌باشد. این نوع نگرش موجب سهولت در توصیف حرکت به وسیله زبان خاص‌منظوره پیشنهادی می‌گردد. علاوه بر آن در قسمت بدنه زبان خاص‌منظوره امکان تعریف شرط‌های مختلفی برای آغاز یا خاتمه هر یک از بخش‌های حرکتی تعریف‌شده می‌باشد. این ویژگی امکان هماهنگی بیشتر بین لینکیج‌های تعریف‌شده به منظور به انجام رساندن وظایفشان را فراهم می‌آورد.

به منظور بهبود عملکرد زبان خاص‌منظوره پیشنهادی، با اعمال تغییراتی در نحو این زبان می‌توان آن را قابل تعمیم به انواع دیگر لینکیج‌ها و در محیط سه‌بعدی نمود. همچنین می‌توان به تحلیل و بررسی و طراحی مدل‌های قابل اجرای حرکت انواع دیگر روبات‌ها و ابعاد بالاتر پرداخت. علاوه بر آن نحو زبان پیشنهادی به گونه‌ای تکامل یابد که قابلیت پوشش محدودیت‌های موانع و تعامل با محیط را داشته باشد.

مراجع

[1] J. E. Goodman, J. O'Rourke, and L. Guibas, *Modeling Motion*, pp. 1114-1132, 2004.

[2] M. Fowler, *Domain Specific Languages*, Addison-Wesley Professional, 1st Ed., 2010.

[3] J. P. Tolvanen and S. Kelly, "Metaedit+: defining and using integrated domain-specific modeling languages," in *Proc. of the 24th ACM SIGPLAN Conf. Companion on Object Oriented Programming Systems Languages and Applications, OOPSLA'09,* pp. 819-820, New York, NY, USA, 25-29 Oct. 2009.

[4] A. Nordmann, N. Hochgeschwender, and S. Wrede, *A Survey on Domain-Specific Languages in Robotics*, pp. 195-206, Cham: Springer International Publishing, 2014.

[5] R. Ryman-Kane, *RhondaHughes Ryman*, Benesh for Ballet, 1 Ed., 2014.

[6] B. M. Farnell, *Movement Notation Systems*, Oxford, 1996.

[7] O. Teitelbaum, *et al.*, "Eshkol-Wachman movement notation in diagnosis: the early detection of asperger's syndrome," in *Proc. of the National Academy of Sciences, United States of America,* vol. 10132, pp. 11909-11914, 28 Jul. 2004.

جدول ۴: مقایسه زبان پیشنهادی.

مرجع	[۱۱] (اشنایدر و همکاران)	[۱۲] (ونتین و همکاران)	[۱۳] (فریگریو و همکاران)	[۱۴] (نوردمان و همکاران)	[۱۵] (برگیسان و همکاران)	DSL پیشنهادی
ساختار						
لینک‌های انعطاف‌پذیر	×		×		×	√
تنوع مفصل‌ها	√		×		√	×
سهولت در تعریف لینک‌های زیاد	×		×		×	√
شیءگرایی در تعریف المنت‌های روبات	√		√		√	×
به کارگیری اجزای تعریف‌شده در دیگر روبات‌ها	√		×		√	√
مکانیزم	Mobile, manipulation		Articulated		Mobile, manipulation	OpenChain
حرکت						
ماژولاریتی	×	×	×	×	×	√
اولویت‌دهی	×	√	×	×		√
دورانی- تبدیلی	√	√	√	√	√	√
تعامل با اشیا	√	√	×	√	√	×
در نظر گرفتن محیط	√	√	√	√	√	×
حرکت هم‌زمان چند روبات	√	×	×	×		√
تنوع در تعریف نوع داده	×	×	×	×	×	√
سینماتیک مستقیم	√	√	√	√	√	√
سینماتیک معکوس	√	√	×	√	√	پیکربندی مجدد
محدودیت‌ها						
صریح	√	√	×	√	√	√
ضمنی	√	√	√	√	√	√
اولویت‌دهی	√	×	×	×	×	×
تمرکز	محدودیت‌ها	تعامل با اشیا و محیط	حل مسایل مربوط به سینماتیک مستقیم	کنترل نیرو- برنامه‌ریزی حرکت	تمرکز بر ساخت روبات	

[8] A. Nordmann, N. Hochgeschwender, D. L. Wigand, and S. Wrede, "A survey on domain-specific modeling and languages in robotics," *J. of Software Engineering in Robotics*, vol. 7, no. 1, pp. 75-99, 2016.

[9] E. D. Demaine and J. O'Rourke, *Part I. Linkages*, Cambridge University Press Cambridge, 2007.

[10] R. Connelly and E. D. Demaine, *Geometry and Topology of Polygonal Linkages*, pp. 213-235, 2004.

[11] S. Schneider, N. Hochgeschwender, and G. K. Kraetzschmar, "Declarative specification of task-based grasping with constraint validation," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 919-926, Chicago, IL, USA, 14-18 Sep. 2014.

[12] D. Vanthienen, M. Klotzbucher, J. D. Schutter, T. D. Laet, and H. Bruyninckx, "Rapid application development of constrained-based task modelling and execution using domain specific languages," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1860-1866, Tokyo, Japan, 3-7 Nov. 2013.

[13] M. Frigerio, J. Buchli, and D. G. Caldwell, "Code generation of algebraic quantities for robot controllers," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2346-2351, Vilamoura, Portugal, 7-12 Oct. 2012.

[14] A. Nordmann, S. Wrede, and J. Steil, "Modeling of movement control architectures based on motion primitives using domain-specific languages," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'15*, pp. 5032-5039, Seattle, WA, USA, 26-30 May 2015.

[15] G. Borghesan, E. Scioni, A. Kheddar, and H. Bruyninckx, "Introducing geometric constraint expressions into robot constrained motion specification and control," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 1140-1147, Jul. 2016.

علی نوراله مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۷ در رشته مهندسی کامپیوتر (نرم‌افزار) از دانشگاه صنعتی‌شریف و دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) دریافت نموده است. ایشان در کلیه مقاطع تحصیلی (کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری) دارای رتبه اول و ممتاز بوده است. زمینه تحقیقاتی ایشان الگوریتم‌های هندسه محاسباتی و حرکت روبات‌ها می‌باشد. ایشان در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی و دارای رتبه استادیاری می‌باشد و دروسی نظیر اصول طراحی کامپایلر، نظریه زبان‌ها و ماشین‌ها، طراحی و پیاده‌سازی زبان‌های برنامه‌سازی، طراحی و تحلیل الگوریتم‌ها و ساختمان‌داده‌ها را در دوره کارشناسی و دروسی نظیر الگوریتم‌های هندسه محاسباتی، الگوریتم‌های موازی پیشرفته، الگوریتم‌های گراف و اصول رمزنگاری را در دوره کارشناسی ارشد تدریس می‌نماید.

نوشین بهزادپور مدرک کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران دریافت نموده است. زمینه تحقیقاتی ایشان هندسه محاسباتی، مدل‌سازی فرمال و حرکت روبات‌ها می‌باشد.