ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):263-268.

Using Edge Computing in Improving the Performance of Machining Robots

ARTICLE INFO

Authors
Karimianrizi M R.[1]*,
Farahat S.[2]

[1] Master of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Department University of Sistan and Baluchestan
[2] Professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan

*** Correspondence**
Master of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Department University of Sistan and Baluchestan
karimianrizi.mr@pgs.usb.ac.ir

How to cite this article
Karimianrizi M R, Farahat S. Using Edge Computing in Improving the Performance of Machining Robots. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):263-268.

ABSTRACT

Optimizing energy consumption in industrial robots can reduce operating costs, improve performance, and extend the life of the robot during manufacturing. In recent years, with the progress of science and technology, new technologies such as cloud computing, big data, etc. have continuously emerged, and in particular, cloud computing technology has been used in robot research that improves the real-time performance of the designed robot. It can also provide high energy efficiency, low cost, etc. One of the most important aspects of this technology is its use in continuous monitoring of robots' performance, which can guarantee its optimal performance. In this research, first, an overview of the methods of reducing energy consumption is presented, and then the effectiveness of using edge computing technology in reducing energy is analyzed. For this purpose, the use of algorithms to optimize the performance of the robot, including its trajectory and working times, is controlled by the edge. The results of the simulations show that the energy consumption can be significantly reduced by using edge technology.

Keywords Machining Robots, Robot Monitoring and Control, Edge Computing, Energy Optimization.

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۲۶۳-۲۶۸

استفاده از محاسبات لبه در بهبود عملکرد ربات های ماشین کاری

چکیده

بهینه سازی مصرف انرژی در ربات های صنعتی می تواند هزینه های عملیاتی را کاهش دهد، عملکرد را بهبود بخشد و طول عمر ربات را در طول ساخت قطعه افزایش دهد. در سال‌های اخیر با پیشرفت علم و فناوری، فناوری‌های جدیدی مانند محاسبات ابری، داده انبوه و غیره به‌طور مداوم ظهور کرده‌اند و از فناوری رایانش ابری در تحقیقات ربات‌ها استفاده شده است که باعث شده ربات طراحی‌شده عملکرد بلادرنگ بالایی داشته باشد. و راندمان انرژی بالا، هزینه کم و یک سری مزایا. یکی از مهم ترین جنبه های این فناوری استفاده از آن در نظارت مستمر بر عملکرد ربات ها دارد که می تواند تضمین کننده عملکرد بهینه آن شود. در این تحقیق ابتدا مروری بر روش های کاهش مصرف انرژی ارائه شده است و در ادامه میزان اثرگذاری استفاده از فناوری محاسبات لبه در کاهش انرژی تجزیه و تحلیل شده است. برای این منظور استفاده از الگوریتم های بهینه سازی عملکرد ربات شامل خط سیر و زمان های کاری آن توسط لبه کنترل می شود. نتایج شبیه سازی های نشان می دهد که با استفاده از فناوری لبه می توان به میزان قابل توجهی انرژی مصرفی را کاهش داد.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها
محمدرضا کریمیان ریزی [۱]*
سعید فراهت[۲]

[۱]کارشناس ارشد مهندسی مکاترونیک، گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه سیستان و بلوچستان
[۲]استاد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

* نویسنده مسئول
آدرس: کارشناس ارشد مهندسی مکاترونیک، گروه مهندسی مکانیک
karimianrizi.mr@pgs.usb.ac.ir

کلیدواژه‌ها ربات های ماشین کاری، نظارت و کنترل ربات، محاسبات لبه، بهینه سازی انرژی.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.10.41.1]
[DOI: 10.22034/mme.23.10.263]

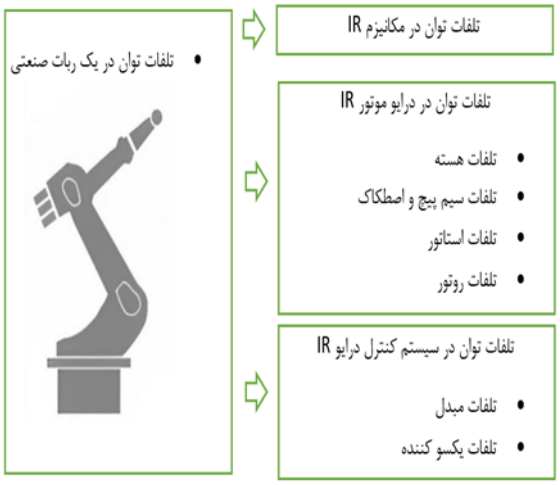
۱- مقدمه

ربات های صنعتی به دلیل توانایی آنها در انجام کارهای تکراری با دقت و سرعت بالا، به طور فزاینده ای در کاربردهای تولیدی و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. با این حال، یکی از نگرانی های کلیدی در استفاده از ربات های صنعتی، مصرف انرژی در زمان های کاری است. ربات‌های صنعتی در طول کار خود معمولاً به شکل نیروی الکتریکی برای موتورهای مختلف و واحدهای کنترل، انرژی مصرف می‌کنند. میزان انرژی مصرفی یک ربات صنعتی به عوامل مختلفی از جمله نوع ربات، اندازه، وظایفی که انجام می دهد و شرایط عملیاتی بستگی دارد [۱].

با توجه به حجم بالای کاربرد ربات‌های صنعتی در صنایع مختلف، بهینه‌سازی مصرف انرژی ربات‌های صنعتی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر راندمان قطعه‌سازی داشته باشد [۲]. بنابراین، ربات‌های صنعتی پیشرفته به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در طول زمان‌بندی‌های کاری از نظر انرژی کارآمد باشند تا بهره‌وری را در بخش‌سازی افزایش دهند. ویژگی های پیشرفته ای مانند ترمز احیا کننده و حالت های کم مصرف که به کاهش مصرف انرژی در زمان کار ربات های صنعتی کمک می کند به منظور به حداقل رساندن مصرف انرژی در شرایط کاری ربات های صنعتی طراحی شده اند [۳]. میزان مصرف انرژی بسته به عوامل مختلفی مانند نوع ربات، وظیفه ای که انجام می دهد، شرایط عملیاتی و کارایی اجزای آن می تواند متفاوت باشد [۴]. برخی از عوامل اصلی که می توانند بر مصرف انرژی ربات های صنعتی تأثیر بگذارند عبارتند از:

- نوع ربات: انواع مختلف ربات ها نیازهای انرژی متفاوتی دارند. به عنوان مثال، یک ربات بزرگ و سنگین ممکن است برای کارکردن به انرژی بیشتری نسبت به یک ربات کوچک و سبک نیاز داشته باشد.
- نحوه ی انجام دستورالعمل ها: مصرف انرژی یک ربات به نوع وظیفه ای که انجام می دهد نیز بستگی دارد. کارهایی که به حرکت زیاد یا بلند کردن اجسام سنگین نیاز دارند ممکن است به انرژی بیشتری نسبت به کارهایی که ساکن هستند نیاز داشته باشند [۵].
- شرایط عملیاتی: مصرف انرژی یک ربات نیز می تواند تحت تأثیر شرایط عملیاتی مانند دما، رطوبت و وجود گرد و غبار یا سایر آلاینده ها قرار گیرد [۶].

تلفات توان در ربات های صنعتی در شکل ۱ نشان داده شده است[۷]. بهینه سازی مصرف انرژی ربات های صنعتی نه تنها برای کاهش هزینه عملیات، بلکه برای کاهش اثرات زیست محیطی فرآیندهای صنعتی مهم است . بهینه‌سازی مصرف انرژی در روبات‌های صنعتی یک جنبه ضروری در تولید سبز است، زیرا به کاهش تولید کربن و هزینه‌های عملیاتی فرآیند تولید کمک می‌کند [۸].



شکل ۱ - تلفات توان در ربات های صنعتی[۷]

با اجرای اقدامات صرفه جویی در انرژی، تولیدکنندگان می توانند اثرات زیست محیطی خود را کاهش دهند و در عین حال بهره وری را در فرآیند تولید بهبود بخشند. برای به حداقل رساندن مصرف انرژی در ربات‌های صنعتی، مدیران صنعت می‌توانند چندین گام از جمله بهینه‌سازی طراحی ربات برای کاهش وزن و بهبود بهره‌وری انرژی، استفاده از موتورها و کنترل‌کننده‌های کارآمدتر، پیاده‌سازی الگوریتم‌های نرم‌افزاری صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش زمان بیکاری در ربات‌های صنعتی را انجام دهند. علاوه بر این، مصرف انرژی ربات‌های آن‌ها را می‌توان به منظور اجرای استراتژی‌های مدیریت انرژی و بهبود بهره‌وری تولید قطعه مورد پایش قرار داد. این فرآیند نیازمند یک رویکرد کل نگر است که طراحی و عملکرد ربات و همچنین بهینه سازی فرآیند تولید را در نظر می گیرد تا مصرف انرژی در فرآیند تولید قطعه را به حداقل برساند [۹].

۲- بهینه سازی مصرف انرژی در ربات های صنعتی

بهینه سازی مصرف انرژی ربات های صنعتی یک نکته مهم برای تولیدکنندگان و صنایع است که می تواند منجر به صرفه جویی قابل توجه در هزینه و کاهش اثرات زیست محیطی شود. بهینه سازی مصرف انرژی در ربات های صنعتی می تواند مزایای قابل توجهی مانند کاهش هزینه های عملیاتی، افزایش کارایی تولید و بهبود پایداری محیطی داشته باشد. اولین قدم در بهینه سازی مصرف انرژی، اندازه گیری مصرف انرژی ربات در حین کار است. این فرآیند را می توان با نصب سنسورها و نظارت بر انرژی بر روی ربات یا منبع انرژی آن پیاده سازی کرد [۱۰].

۲-۱- انتخاب صحیح ربات

انتخاب ربات صنعتی مناسب برای عملیات خاص در فرآیند تولید به منظور کاهش مصرف انرژی در طول زمان کار مهم است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.10.41.1]
[DOI: 10.22034/mme.23.10.263]

ربات‌هایی که بزرگ‌تر و سنگین‌تر هستند، معمولاً نسبت به ربات‌هایی که کوچک‌تر و سبک‌تر هستند، به انرژی بیشتری برای عملکرد نیاز دارند.

۲-۲- موتورهای کم مصرف در ربات های صنعتی

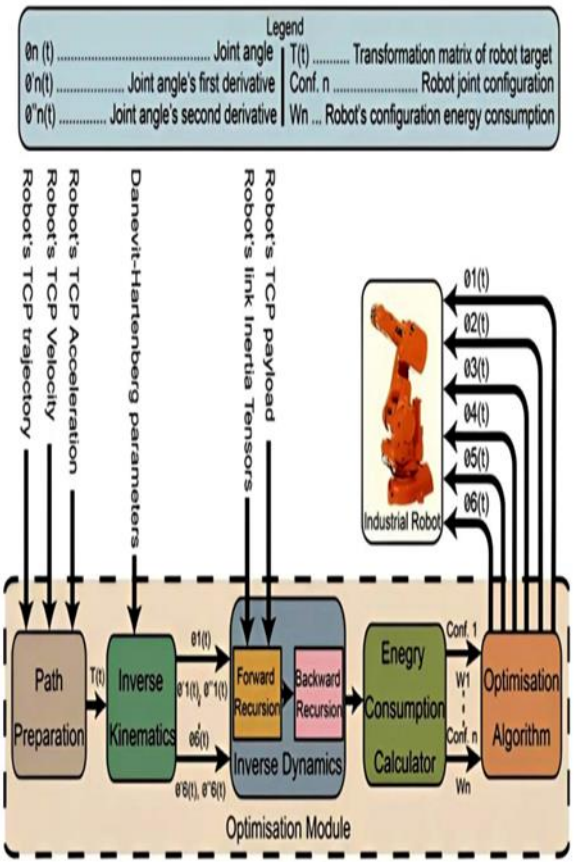
ربات‌های صنعتی از موتورهای الکتریکی برای به حرکت درآوردن محورهای مختلف خود و انجام وظایفی مانند گرفتن، حرکت و جابجایی اشیا استفاده می‌کنند. مقدار انرژی مصرف شده توسط این موتورها به اندازه، وزن و توان مورد نیاز ربات بستگی دارد. ربات‌های بزرگ‌تر و سنگین‌تر معمولاً به انرژی بیشتری نسبت به ربات‌های کوچک‌تر و سبک‌تر نیاز دارند. علاوه بر موتورها، سایر اجزای ربات های صنعتی نیز می توانند انرژی مصرف کنند، مانند حسگرها، سیستم های کنترل و سیستم های خنک کننده [۱۱].

۲-۳- بهینه سازی برنامه ریزی ربات

نحوه برنامه ریزی حرکات ربات می تواند بر مصرف انرژی در حین کار تأثیر بگذارد. بهینه‌سازی مسیر ربات و حرکت روبات‌های صنعتی برای به حداقل رساندن حرکت غیرضروری می‌تواند مصرف انرژی را در برنامه‌های کاری کاهش دهد. برنامه ریزی حرکتی یکنواخت و کارآمد می تواند مصرف کلی انرژی را کاهش دهد. بهینه سازی الگوریتم های مسیر ربات برای تولید مسیرهای کم مصرف می تواند مصرف کلی انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. تکنیک هایی مانند بهینه سازی مسیر، هموارسازی مسیر و در نظر گرفتن هزینه های انرژی در طول برنامه ریزی مسیر می توانند برای به حداقل رساندن مصرف انرژی به کار گرفته شوند. برنامه ریزی ربات برای حرکت با سرعت های بهینه و به حداقل رساندن شتاب و شتاب بیش از حد نیز می تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند.

همچنین، ابزارهای شبیه‌سازی می‌توانند به منظور مدل‌سازی و تحلیل مصرف انرژی رفتارهای مختلف ربات، الگوریتم‌ها و پیکربندی‌های سیستم مورد استفاده قرار گیرند. تکنیک های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی را می توان به منظور یادگیری عملکرد کم مصرف و انطباق اقدامات ربات بر اساس شرایط محیطی و وظیفه به کار برد. در نتیجه، برنامه‌ریزی کارآمد و زمان‌بندی کار هوشمند ربات‌های صنعتی می‌تواند با به حداقل رساندن حرکات غیرضروری و بهینه‌سازی مسیر ربات، به کاهش مصرف انرژی ربات‌های صنعتی کمک کند [۱۲].

علاوه بر این، حرکت بهینه ربات همچنین می تواند به کاهش اصطکاک و فرسودگی ربات کمک کند و در نتیجه هزینه های تعمیر و نگهداری را کاهش دهد. به حداقل رساندن مصرف انرژی برای حرکت بازوی ربات در شکل ۶ ارائه شده است. برای به حداقل رساندن مصرف انرژی ربات ها در هنگام مونتاژ در یک محیط ابری، ربات کارآمد انرژی ارائه شده است [۱۳].



شکل ۶. نمونه ای از به حداقل رساندن مصرف انرژی برای حرکت بازوی ربات [۱۳].

۲-۴- نظارت بر انرژی مصرفی در طول زمان کار ربات ها

نظارت می تواند نقش مهمی در بهینه سازی مصرف انرژی ربات های صنعتی داشته باشد. نظارت بر مصرف انرژی ربات می تواند به شناسایی مناطقی که می توان در آن انرژی صرفه جویی کرد کمک کند. این می تواند به شناسایی پیشرفت های بالقوه در بهره وری انرژی کمک کند. این فرآیند را می توان از طریق نرم افزار یا سخت افزار نظارت بر انرژی که مصرف انرژی را در طول زمان کار ربات های صنعتی ردیابی می کند، پیاده سازی کرد.

۲-۵- ویژگی های صرفه جویی در انرژی در سیستم کنترل ربات‌ها

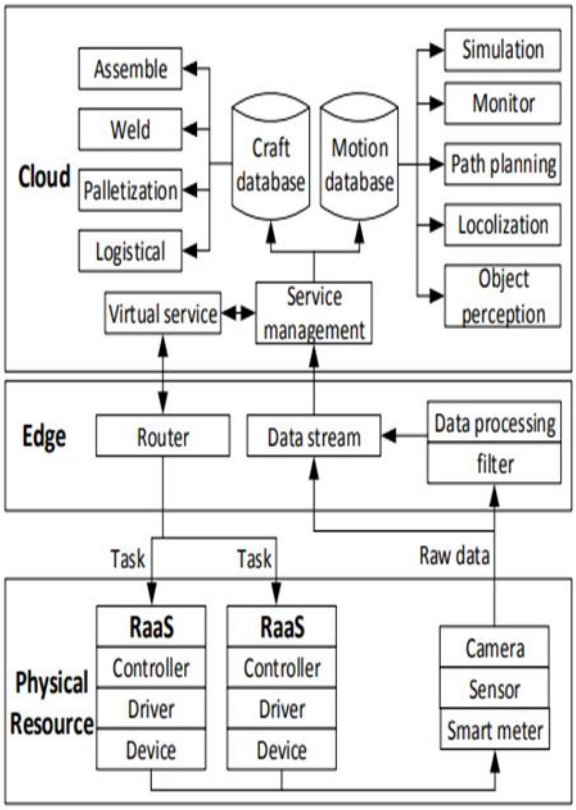
صرفه جویی در انرژی می تواند به کاهش مصرف انرژی در طول دوره کار ربات ها کمک کند. ربات‌های صنعتی پیشرفته با ویژگی‌های صرفه‌جویی در انرژی، مانند حالت خواب یا خاموش شدن خودکار در شرایط کاری مختلف طراحی شده‌اند. این می تواند شامل اجرای حالت های خواب در زمانی که ربات بیکار است، استفاده از ترمز احیا کننده برای بازیابی انرژی در حین کاهش سرعت و استفاده از نرم افزار مدیریت توان برای بهینه سازی مصرف انرژی باشد. این ویژگی‌ها را می‌توان طوری برنامه‌ریزی کرد که در زمانی که ربات استفاده نمی‌شود فعال

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.10.41.1]
[DOI: 10.22034/mme.23.10.263]

شوند و مصرف انرژی را کاهش دهند. می تواند به کاهش مصرف انرژی از نظر به حداقل رساندن انرژی ربات های صنعتی کمک کند. به عنوان مثال، برخی از ربات ها حالت خواب یا حالت صرفه جویی در مصرف انرژی دارند که می تواند در دوره های عدم فعالیت فعال شود [۱۴].

۳- استفاده از فضای ابری به منظور نظارت بر ربات

به دلیل رشد داده ها و فناوری های تجزیه و تحلیل آن ها، امروزه استفاده از آن ها در حوزه ربات های صنعتی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. محاسبات لبه نیز به دلیل قابلیت هایی مانند تاخیر کم و پهنای باند زیادی که در اختیار قرار می دهند مورد استفاده قرار گرفته اند که نمونه ای از آن در شکل نشان داده شده است[۱۵].



شکل ۱: نمای کلی معماری سیستم، با سه لایه اصلی (ابر، لبه، و منبع فیزیکی).[۱۵]

لایه ابری به عنوان هماهنگ کننده و ناظر خدمات سیستم ربات عمل می کند. کاربران می توانند از طریق یک API به ابر از طریق شبکه دسترسی پیدا کنند. مؤلفه اصلی لایه ابری - مدیریت خدمات - به طور منسجم خدمات را مدیریت می کند و بسته های خدمات را بر اساس آن اجرا می کند. وضعیت منابع موجود (اطلاعات ارائه شده توسط سرویس نظارت) را برای شناسایی بهترین نامزدها برای میزبانی یک ماژول برنامه و تخصیص منابع دستگاه پیگیری می کند.

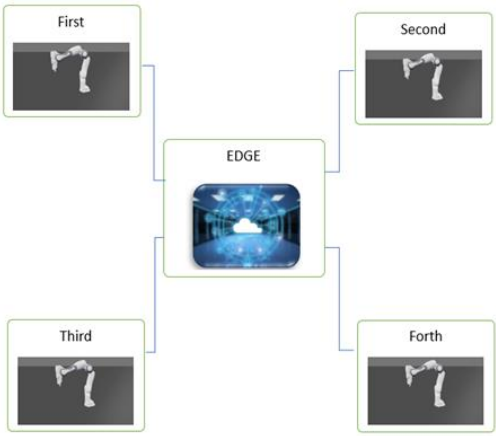
۳-۲- لایه لبه

لایه لبه بستری را برای فیلتر کردن و تجزیه و تحلیل داده های تولید شده توسط حسگرها فراهم می کند و معماری پردازش داده را توزیع می کند و در نتیجه مقیاس پذیر می شود. دستگاه‌های این لایه هر عنصری هستند که می‌توانند ماژول‌های برنامه را میزبانی کنند، مانند سرورها، رایانه شخصی محلی، روترها و گیت ها. بین لایه ابر و منبع فیزیکی، لایه لبه به سه دلیل اصلی اختیاری است. اول، برای انجام وظایف پیچیده، حجم عظیمی از داده های میدانی (مانند توان، جریان و نیرو) به صورت پویا توسط حسگرها تولید می شود. پخش مستقیم تمام داده های خام به ابر ناکارآمد است، زیرا بیشتر محتواها غیرضروری هستند و ترافیک شبکه سنگینی ایجاد می کنند. بنابراین، لبه می تواند داده ها را فیلتر و پیش پردازش کند. سپس نتیجه فیلتر شده در فضای ابری آپلود می شود. این به تعادل بار پهنای باند و مدیریت داده های ابری کمک می کند. دوم، چالش دستیابی به قابلیت زمان واقعی عملکردهای کنترل ربات است.

۳-۳- لایه منابع فیزیکی

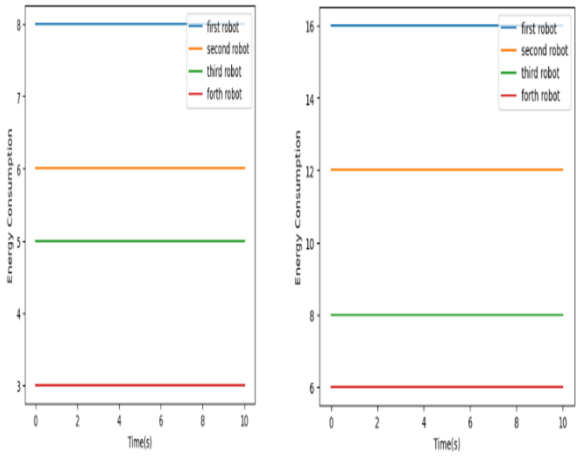
در لایه منابع فیزیکی، کنترل‌کننده‌های ربات فایل‌های وظیفه دریافتی از ابر را تفسیر کرده و دستورالعمل‌های حرکتی را تولید می‌کنند. این دستورالعمل ها، از جمله روش درون یابی و نقطه هدف، برای هدایت سروووها ارسال می شوند. کنترل‌کننده ربات می‌تواند در زمان واقعی کار کند، و سیستم تعبیه‌شده هر عملکرد حیاتی بلادرنگ را برای کنترل ربات اجرا می‌کند. فرآیند تولید توسط سنسورهایی مانند دوربین ها و کنتورهای هوشمند اندازه گیری و نظارت می شود. نتایج اندازه‌گیری پردازش شده توسط دستگاه‌های لبه برای شبیه‌سازی، نظارت، ارزیابی عملکرد، برنامه‌ریزی حرکت و جبران مسیر به ابر بازگردانده می‌شوند. بنابراین، یک سیستم ربات حلقه بسته را تشکیل می دهد.

حالتی که هر کدام از آن ها به طور مستقل عمل می کنند مقایسه شده است که نتایج آن در جدول مشاهده می شود.



ساختار شبیه سازی شده به منظور بهینه سازی عملکرد ربات ها به کمک محاسبات لبه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.10.41.1]
[DOI: 10.22034/mme.23.10.263]



ب الف

به منظور ارزیابی استفاده از محاسبات ابری در عملکرد خط سیر ربات ها، سناریوی نشان داده شده در شکل به کمک جعبه ابزار رباتی پایتون شبیه سازی شده که در آن چندین ربات مدیریت می شوند. سپس به کمک الگوریتم های بهینه سازی جدید بارگذاری شده در فضای ابری خط سیر آن ها بهینه سازی شده است. در این حالت نتایج شبیه سازی ها با مقایسه مصرف انرژی در بازه زمانی اول، الف- زمانی که ربات ها به صورت مجزا عمل می کنند، ب- زمانی که ربات ها توسط فضای ابری مدیریت می شوند.

در بازه زمانی اول الگوریتم های بهینه سازی خط سیر فقط در لبه وجود دارد و لذا تفاوت زیادی میان انرژی مصرفی دو حالت وجود دارد. در بازه زمانی دوم فقط دو تا از ربات هایی که به صورت مجزا عمل می کنند از الگوریتم های بهینه سازی استفاده می کنند. در بازه زمانی سوم همه ربات هایی که در حالت مجزا عمل می کنند از الگوریتم بهینه سازی استفاده می کنند. در بازه زمانی چهارم در لبه الگوریتم جدیدی مورد استفاده قرار می گیرد و در نهایت در بازه زمانی پنجم این الگوریتم در نیمی از ربات های مجزا مورد استفاده قرار می گیرد.

همان گونه که نتایج نشان می دهند به کمک معماری محاسبات لبه می توان به میزان قابل توجهی میزان انرژی مصرفی ربات های ماشین کاری را بهبود داد.

نتیجه گیری

از آنجایی که حسگرها و محرک‌های بیشتری در تولید صنعتی مستقر می‌شوند، صنعت به یک معماری سیستم تولید جدید نیاز دارد که عملکرد انتقال در زمان واقعی و شبکه را بهتر ارائه دهد. با این حال، محاسبات ابری (بر اساس یک مرکز داده متمرکز) از نظر امکانات محدود است، زیرا از هزینه های پهنای باند سنگین و تاخیرهای زمانی طولانی رنج می برد. لذا در این تحقیق معماری مبتنی بر لبه ارائه داده شده است که می تواند بهینه سازی مصرف انرژي را با تاخیر پایین ارائه دهد. نتایج مصرف انرژي

جدول مقایسه انرژی مصرف شده در حالت عملکرد مجزا و متصل به لبه

بازه زمانی	مجموع انرژی مصرفی زمانی که به طور مستقل عمل می کنند(J).	مجموع انرژی مصرفی زمانی که توسط لبه کنترل می شوند(J).	درصد بهبود
بازه زمانی اول	۴۲	۲۲	۴۷
بازه زمانی دوم	۳۸	۲۱	۴۴
بازه زمانی سوم	۲۸	۲۲	۲۱
بازه زمانی چهارم	۲۸	۱۸	۳۵
بازه زمانی پنجم	۲۴	۱۸	۲۵

نشان دهنده اهمیت استفاده از فناروی لبه در ربات های صنعتی است.

مراجع

[1] M. Pellicciari, G. Berselli, F. Leali, A. Vergnano, A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots, Mechatronics 23 (2013) 326–334.

[2] L. Bukata, P. Šůcha, Z. Hanzálek, P. Burget, Energy optimization of robotic cells, IEEE Trans. Ind. Inf. 13 (2016) 92–102.

[3] D. Meike, M. Pellicciari, G. Berselli, Energy efficient use of multirobot production lines in the automotive industry: detailed system modeling and optimization, IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. 11 (2013) 798–809.

[4] B. Zhou, Q. Wu, Decomposition-based bi-objective

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.10.41.1]
[DOI: 10.22034/mme.23.10.263]

optimization for sustainable robotic assembly line balancing problems, J. Manuf. Syst. 55 (2020) 30–43

[5] E. Coronado, T. Kiyokawa, G.A.G. Ricardez, I.G. Ramirez-Alpizar, G. Venture, N. Yamanobe, Evaluating quality in human-robot interaction: a systematic search and classification of performance and human-centered factors, measures and metrics towards an industry 5.0, J. Manuf. Syst. 63 (2022) 392–410.

[6] M. Gadaleta, G. Berselli, M. Pellicciari, F. Grassia, Extensive experimental investigation for the optimization of the energy consumption of a high payload industrial robot with open research dataset, Robot. Comput. Integr. Manuf. 68 (2021) 102046.

[7] M. Brossog, M. Bornschlegl, J. Franke, Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 78 (2015) 1315–1328.

[8] J. Liu, W. Xu, J. Zhang, Z. Zhou, D.T. Pham, Industrial cloud robotics towards sustainable manufacturing, International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2016 V002T004A017

[9] A. Vergnano, C. Thorstensson, B. Lennartson, P. Falkman, M. Pellicciari, F. Leali, S. Biller, Modeling and optimization of energy consumption in cooperative multi-robot systems, IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. 9 (2012) 423–428.

[10] L. Wang, A. Mohammed, X.V. Wang, B. Schmidt, Energy-efficient robot applications towards sustainable manufacturing, Int. J. Comput. Integr. Manuf. 31 (2018) 692–700.

[11] G. Pastras, A. Fysikopoulos, G. Chryssolouris, A theoretical investigation on the potential energy savings by optimization of the robotic motion profiles, Robot. Comput. Integr. Manuf. 58 (2019) 55–68.

[12] V. Zanotto, A. Gasparetto, A. Lanzutti, P. Boscariol, R. Vidoni, Experimental validation of minimum time-jerk algorithms for industrial robots, J. Intell. Rob. Syst. 64 (2011) 197–219.

[13] A. Mohammed, B. Schmidt, L. Wang, L. Gao, Minimizing energy consumption for robot arm movement, Procedia Cirp 25 (2014) 400–405

[14] L. Scalera, I. Palomba, E. Wehrle, A. Gasparetto, R. Vidoni, Natural motion for energy saving in robotic and mechatronic systems, Appl. Sci. 9 (2019) 3516.

[15] Wang, Gang, Wenlong Li, Cheng Jiang, Dahu Zhu, Zhongwei Li, Wei Xu, Huan Zhao, and Han Ding. "Trajectory planning and optimization for robotic machining based on measured point cloud." IEEE transactions on robotics 38, no. 3 (2021): 1621-1637.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.10.41.1]

[DOI: 10.22034/mme.23.10.263]