

نقش ربات در پیش ساخته سازی و موانع و محاسن آن در صنعت ساختمان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

کد مقاله: ۳۳۴۴۲

یاسر شهبازی^{۱*}، فائزه پاک روان^۲

چکیده

صنعت ساخت و ساز در پیش ساخته سازی نیازمند یک سازماندهی کارآمد و موثر برای فرآیند تولید و تکنیک‌های نوآورانه ساخت و ساز برای رقابتی مفید در برابر رشد جهانی در قرن ۲۱ است. مشکلات مرتبط با ساخت و ساز، مانند کاهش کیفیت و تولید، کمبود نیروی کار و ایمنی و شرایط بد کار، جستجوی راه حل‌های نوآورانه را ایجاد می‌کند. یک راه حل استفاده از فناوری‌های نوآورانه تولید مانند اتوماسیون و رباتیک است که پتانسیل رشد در صنعت ساخت و ساز و تولید و ایمنی و کیفیت را دارد. بیشتر تحقیقات در زمینه رباتیک و اتوماسیون بر روی ارتقای سخت‌افزار و نرم افزار متمرکز شده است. این مقاله به کاربرد گسترده ربات در مونتاژ در محل و صنعت ساخت در پیش ساخته سازی مربوط می‌شود. هدف از این پژوهش شناسایی و تبیین موانع و مزایای روش‌های اتوماسیون و رباتیک در پیش ساخته سازی است که با بررسی و کاوش در ویژگی‌های صنعت ساخت و فرآیند آن صورت می‌گیرد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

واژگان کلیدی: پیش ساخته سازی، ربات، مزایا، معایب، صنعت ساخت

۱- دانشیار دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نویسنده مسئول) y.shahbazi@tabriziau.ac.ir

۲- دانشجو دانشگاه هنر اسلامی تبریز

۱- مقدمه

فرآیندهای طراحی دیجیتال در معماری، طی ۵۰ سال گذشته به روش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. استفاده از ربات‌ها در ساخت دیجیتال یکی از فرآیندهای طراحی دیجیتال است که امروزه با حرکت زیبایی‌شناختی و غیرقابل پیش بینی خود که شبیه انسان است، معماران را به خود جذب کرده است. (Braumann, J., & Brell-Cokcan, S., 2012) ربات‌ها ماشین‌های چند منظوره برای تولید انبوه هستند، همانطور که در چنین پروژه‌هایی، Gramazio & Kohler مشاهده می‌شود، ربات حتی می‌توانند چندین کار متفاوت را در تولید یک محصول انجام دهد (Brell-Cokcan, S., & Braumann, 2010) برای دستیابی به عملیات کنترل خودکار، ساخت و ساز خودکار مبتنی بر رباتیک به عنوان ابزار مکانیکی در فرآیند ساخت تعریف می‌شود (Hewitt, M., & Gambatese, J., 2003) نیاز صنعت ساختمان به خانه‌های پیش ساخته ارتباط نزدیکی با ساخت مدولار دارد. بنابراین، دانستن عوامل محدود کننده‌ای که در مسیر طراحی مدولار وجود دارد، مساله‌ای ضروری است که یک معمار باید آن را درک کند. تقاضا برای ساختمان‌های مدولار و پیش ساخته به معنای بهبود بازدهی تولید و ایمنی کارگران است. به همین دلیل، کیفیت طراحی ساختمان مدولار مورد سوال قرار خواهد گرفت که آیا این فرآیند، از نظر معمار، شایسته فرآیند ساخت و ساز است یا خیر. به همین دلیل محدودیت‌ها و موانع طراحی نوآورانه در ساخت و ساز مدولار از دیدگاه معمار مورد بررسی قرار می‌گیرد (Schoenborn, J., 2012) بدین ترتیب، سوالات زیر مطرح خواهد شد:

- ۱- چرا معماران روش‌های رباتیک را برای ساخت انتخاب می‌کنند؟
 - ۲- محدودیت‌های فنی روش رباتیک چیست؟
 - ۳- روش‌های رباتیک چه مزایایی برای صنعت پیش‌ساخته سازی دارند؟
 - ۴- دسته بندی ربات‌ها در صنعت پیش ساخته چیست؟
- دو شرکت ABB و KUKA که در زمینه رباتیک فعالتر هستند، تولید کننده ربات‌های صنعتی مختلف می‌باشند.

۲- پیشینه پژوهش

پیشینه و تاریخچه این پژوهش به صورت خلاصه در جدول زیر آمده است.

جدول ۱- پیشینه پژوهش (مأخذ: نگارنده)

نویسنده	نتیجه پژوهش
شبیه سازی و کنترل ربات بلادرنگ برای طراحی معماری (Braumann, J., & Brell-Cokcan, S., 2012)	پروژه‌های ارائه شده باید به عنوان اثبات مفاهیمی در نظر گرفته شوند که قدرت استفاده از یک محیط برنامه نویسی را برای ساخت نشان می‌دهند و به موضوعاتی مانند سفارشی سازی انبوه و تولید مبتنی بر مواد می‌پردازند. از آنجایی که طراحی و ساخت هر دو به طور همزمان در یک محیط پیوسته انجام می‌شوند، می‌توان یک هوشمندی پارامتریک را حفظ کرد و مسیرهای ابزار را به سرعت نمونه سازی کرد، بدون نیاز به وارد کردن و صادر کردن داده‌ها.
ابزار طراحی پارامتریک جدید برای فرز ربات، (Brell-Cokcan, S., & Braumann, J., 2010)	در این مقاله، ما یک گردش کار دیجیتالی بهینه ارائه کرده‌ایم که محاسبات را در زمان واقعی انجام می‌دهد و در نتیجه یک لایه اضافی از بازخورد طراحی فوری ارائه می‌دهد، این محاسبات را می‌توان به صورت بلادرنگ انجام داد.
توجه به اتوماسیون در طول طراحی پروژه، (Hewitt, M., & Gambatese, J., 2003)	زمانی که فرصت‌های پیمانکار برای کاربردهای اتوماسیون در نظر گرفته می‌شود، اجرای فناوری‌های خودکار می‌تواند تا حد زیادی از طریق فرآیند طراحی تحت تأثیر قرار گیرد. این امر از طریق ارتباط سیال بین سازنده و طراح امکان پذیر می‌شود. این ارتباط باید به طور بهینه در مرحله طراحی انجام شود.
رویکرد مطالعه موردی برای شناسایی محدودیت‌ها و موانع نوآوری طراحی برای ساخت و ساز مدولار (Schoenborn, J., 2012)	این مطالعه؛ برای کشف چالش‌های ارائه شده برای معماران درگیر در طراحی ساختمان‌های مدولار طراحی شده است.
اکستروژن رباتیک سازه‌های معماری با توپولوژی غیر استاندارد، (Huang, Y., Carstensen, J., Tessmer, L., & Mueller, C., 2018)	این مقاله یک چارچوب برنامه‌ریزی مسیر جدید، را نشان می‌دهد و از آن برای نشان دادن اینکه چگونه باز کردن توپولوژی به عنوان یک متغیر طراحی در اکستروژن رباتیک، فرصتی برای ساختارهای کارآمدتر و انعطاف‌پذیری خلاقانه‌تر ارائه می‌دهد، استفاده کرده است. سه مطالعه موردی ارائه شد که هر کدام دارای توپولوژی غیر استاندارد و بیش از ۲۰۰ عنصر هستند.
ادغام رفتار مواد و فرآیندهای ساخت رباتیک در طراحی محاسباتی برای سازه‌های چوبی اجرایی، دانشگاه آخیم منگس اشتوتگارت دانشگاه هاروارد (Menges, A., 2011)	این سه پروژه تحقیقاتی نشان می‌دهند که چگونه ترکیب مواد، فرم و عملکرد در فرآیندهای طراحی محاسباتی یکپارچه، امکان استخراج ساختارهای پیچیده را از سیستم‌های مواد بدون عارضه فراهم می‌کند، که هم برای ساخت مقرون به صرفه و هم از نظر مادی کارآمد هستند و در عین حال فرصت‌های معماری منحصر به فردی را فراهم می‌کنند.

با توجه به مشکلات اقتصادی و اتوماسیون، ربات‌های صنعتی در ساخت کامل به عنوان جایگزینی برای کارهای دستی در دهه ۱۹۸۰ در ژاپن پیشنهاد می‌شوند. توسعه استراتژی‌های برنامه‌نویسی خودکار برای استفاده از ربات‌ها در "ساخت و ساز سفارشی" اساسی است.	کنترل ربات پارامتریک، CAD/CAM یکپارچه برای طراحی معماری، (Braumann, J., & Brell-Cokcan, S., 2011)
صنعت رباتیک یک صنعت جدید از علم مدرن است که از مرزهای مهندسی فراتر می‌رود. برای درک کامل صنعت ربات و پیچیدگی آن، آنها به دانش مهندسی برق، مهندسی مکانیک، علوم کامپیوتر و ریاضیات و اقتصاد نیاز دارند.	ربات دینامیک و کنترل ویرایش دوم (Spong, M. W., 2005)
این مقاله یک رویکرد جدید برای مونتاژ ارائه می‌کند که از ساخت دیجیتال برای افزایش توسعه تکنیک‌های رباتیک استفاده می‌کند.	ساخت چوب رباتیک - گسترش ساخت افزودنی به ابعاد جدید (Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinaraska, A. A., Gramazio, F., & Kohler, M., 2016)
سیستم‌های برنامه‌نویسی ربات به طور قابل توجهی قدرتمندتر و هوشمند شده‌اند و فراتر از زبان‌های ابتدایی و مبتنی بر متن و برنامه‌نویسی ضبط و یخش با نمایش، به سیستم‌های هوشمندتری که پشتیبانی قابل توجهی از کاربر برنامه‌نویس ارائه می‌دهند، رفته‌اند. زبان‌های مبتنی بر متن در حال تبدیل شدن به سطح بالاتر هستند و کار مورد نیاز برای پیاده‌سازی سیستم‌ها را کاهش می‌دهند. سیستم‌های گرافیکی و خودکار قوی‌تر می‌شوند و به افراد با مهارت‌های فنی کم یا بدون مهارت اجازه می‌دهند روبات‌ها را برنامه‌نویسی کنند.	بررسی سیستم‌های برنامه‌نویسی ربات، (Biggs, G., & MacDonald, B., 2003.)
توسعه ربات برد بزرگ برای مونتاژ در محل بلوک‌ها برای صنعت ساخت و ساز در این مقاله ارائه شده است. مفهوم CIC توسعه یافته تحت پروژه ROCCO و اجرای آن به طور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد. ایده‌های اصلی طراحی سینماتیکی ربات، معماری سیستم کنترل آن، به ویژه برای محرک‌های مبتنی بر هیدرولیک، و رابط انسان و ماشین نیز ارائه شده است.	مونتاژ سایت در صنعت ساخت و ساز با استفاده از یک ربات پیشرفته پیشرفته (Balaguer, C., 1996)
با توجه به پیچیدگی بالای فرآیند ساخت و ساز و توسعه فناوری راکد، آماده‌سازی طولانی مدت برای انطباق آن با روش‌های ساخت و ساز پیشرفته ضروری است. معماران، مهندسان و سایر شرکت‌کنندگان در فرآیند ساخت و ساز باید در این فرآیند انطباق ادغام شوند.	اتوماسیون ساختمانی و رباتیک، (Bock, T., 2008)
این سه پروژه تحقیقاتی نشان می‌دهند که چگونه ترکیب مواد، فرم و عملکرد در فرآیندهای طراحی محاسباتی یکپارچه، امکان استخراج ساختارهای پیچیده را از سیستم‌های مواد بدون عارضه فراهم می‌کند، که هم برای ساخت مقرون به صرفه و هم از نظر مادی کارآمد هستند و در عین حال فرصت‌های معماری منحصربه‌فردی را فراهم می‌کنند.	پیش ساخته رباتیک سازه‌های چوبی: به سمت مونتاژ فضایی در مقیاس بزرگ (Eversmann, P., 2017)

۳- دسته بندی ربات‌ها:

ربات‌ها بر اساس چندین معیار مهم مانند منبع انرژی یا مکان دقیق مفصل‌ها و هندسه و ساختار سینماتیک دسته بندی می‌شوند. این طبقه بندی در درجه اول برای تعیین ربات مناسب برای یک کار خاص در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، ربات‌هایی که برای عملیات فرز و برش استفاده می‌شوند، برای مونتاژ مناسب نیستند (Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M., 2020)



شکل ۱- نمونه ربات، ربات KUKA سمت راست و ربات نظارت کننده سمت چپ

۴- مزایا و معایب

ربات‌ها نوار ابزار قابل قبولی را برای معماران فراهم می‌کنند که این یکی از ویژگی‌هایی است که معماران را مجذوب خود کرده است. ربات‌ها ذاتاً چند منظوره هستند و شرایط کار ایمن را برای نیروی کار فراهم می‌کنند و در نهایت هزینه‌ها را کاهش می‌دهند در حالیکه فضای زیادی را اشغال می‌کنند. (Braumann, J., & Brell-Cokcan, S., 2012)

ربات‌ها به معماران کمک می‌کنند تا سطوح ساخت را آسان‌تر انجام دهند و می‌توانند با مواد مختلفی مانند چوب، بتن، پانل‌های استاندارد و غیر استاندارد استفاده شوند. (Huang, Y., Carstensen, J., Tessmer, L., & Mueller, C., 2018, Menges, A., 2010)

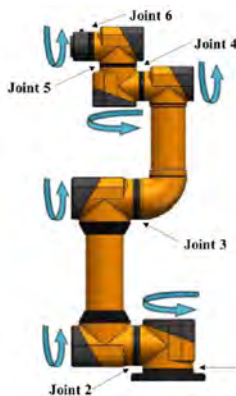
یکی از مزایای ساخت رباتیک این است که می‌توانید طرح را به صورت پارامتریک انجام دهید. همانطور که واضح است، طراحی پارامتریک نیازمند فرآیندی انعطاف‌پذیر است که ربات‌ها این مشکلات را حل می‌کنند. (Braumann, J., & Brell-Cokcan, S., 2011) به طور کلی، ۱۲ استراتژی متمایز برای برنامه ریزی ربات‌های صنعتی وجود دارد که شامل برخط بودن، خودکار بودن، و دستی بودن برنامه ریزی آن‌ها است. برنامه نویسی برخط عمدتاً برای کاربردهای صنعتی مانند بارگذاری و جوشکاری استفاده می‌شود که نقاط آن جدا هستند که از طریق KCP یا محیط مجازی KUKA آموزش داده می‌شود. در زمینه معماری کار بیشتر با سیستم‌های دیجیتال انجام می‌شود و برنامه نویسی برخط به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. (Braumann, J., & Brell-Cokcan, S., 2011)

ربات دیگری که ربات فرزند نامیده می‌شود، همانطور که از نامش پیداست، برای برش استفاده می‌شود و به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های ساخت در کارگاه‌های ساختمانی معماری استفاده می‌شود. (Brell-Cokcan, S., & Braumann, J., 2010) یکی از ایرادات ربات فرزند، پیچیدگی هندسی این نوع ربات است و همچنین کنترل حرکت ربات CNC مشکل بوده و گردش کار پیچیده‌ای دارد که اغلب معماران آن را محدودیتی برای پروژه‌های خود می‌دانند (Brell-Cokcan, S., & Braumann, J., 2010)

۵- درجات آزادی و فضای کار

تعداد مفاصل، درجه آزادی^۲ را تعیین می‌کند. به طور کلی، یک عمل‌کننده باید ۶ درجه آزادی داشته باشد، سه عدد برای جهت، سه عدد برای موقعیت. کمتر از شش درجه آزادی برای زوایای دلخواه قابل استفاده نیست. برای چرخش‌های خاص، بیش از شش درجه آزادی مورد نیاز است که به اطراف یا عقب دسترسی داشته باشد. (Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M., 2020)

نوع دیگری از ربات‌هایی که در این مطالعه ارائه شده است، ROCCO نام دارد که ربات مونتاژ برای ساخت یکپارچه کامپیوتر است که برای بلوک مونتاژ شده- حداکثر اندازه ۵۰*۵۰*۱۰۰ سانتی‌متر- استفاده میشود، دارای درجه آزادی ۶ است، برای حرکت در راستای عمودی ۵ درجه آزادی کافی است اما این ربات‌ها توسعه یافته هستند و دارای درجه آزادی ۶ هستند. یعنی توانایی آن‌ها برای انتقال و حرکت بیشتر است. اگرچه به دلیل اندازه ربات، محدودیت‌هایی در حرکت و حمل و نقل در جاده دارد. ایده اصلی طراحی ربات‌های سینماتیک این است که این ربات‌ها فضای زیادی را اشغال می‌کنند. (Brell-Cokcan, S., & Braumann, J., 2010)



شکل ۲- نمونه درجه آزادی بازوها در ربات KUKA

کاربرد مفید دیگر ربات‌ها برای معماران نیز کمک به ساخت توپولوژی‌های پیچیده، پانل‌های نامنظم و غیر استاندارد با متریکال‌های مختلف است اما ربات‌ها در این فرآیندها مشکل دارند، بنابراین معماران به روشی برای سهولت بخشیدن به این فرآیند نیاز دارند، بنابراین در پاسخ به این نیاز برنامه‌نویسی رباتیک ساده‌تر برای توپولوژی‌های پیچیده و متراکم در زمینه معماری، بنابراین در پاسخ به این نیاز برای ساده‌تر کردن برنامه ریزی ریزی برای توپولوژی‌ها پیچیده در حوزه معماری این مقاله یک سیستم کنترل حرکت خودکار به نام Choreo معرفی می‌کند که نیاز به دخالت انسان در انجام فرایند‌ها و کارهای خسته‌کننده و جمع‌آوری نتایج خطایابی و زمان بندی انجام وظایف دارد (Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A. A., Gramazio, F., & Kohler M., 2016)

سیستم رباتیک برای صرفه جویی در زمان و جلوگیری از مداخله انسان در پروژه، به خصوص زمانی که ربات به صورت دستی توسط انسان مدیریت نمی‌شود مفید است. و در پایان طرح‌هایی در مقیاس ۱:۱ و داده‌های دیجیتال ارائه می‌شود و همین دلایل ربات‌ها در صنعت تولید نفوذ کرده‌اند و اگر بخواهند نقش خود را در گردش کار معماری گسترش دهند بایستی توسعه یافته‌تر

1- Milling
2- Degree Of Freedom

شوند. (Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A. A., Gramazio, F., & Kohler, M., 2016)

ربات‌ها ماشین‌های پیچیده‌ای هستند و برای کنترل آن‌ها به تکنیک و دانش خاصی نیاز است، در مورد ربات‌های ساده‌ای که کنترل راحت‌تری دارند، مانند *Roomba vacuuming*، سادگی این روش کنترل ربات در این است که فقط برای انجام یک کار تعبیه شده است. پنل کنترل ربات به کاربران اجازه می‌دهد تا اتاق‌هایی با ابعاد مختلف را انتخاب کند تا ربات کار خود را شروع کند. بیشتر ربات‌ها دارای رابط کنترلی پیچیده‌ای هستند که معمولاً برنامه نویسی پیچیده‌ای خواهند داشت، در حالی که این ربات‌ها باید قادر باشند تا نیازهای کاربران مختلفی را مدیریت کنند. حوزه برنامه ریزی ربات به دو حالت دستی و حالت خودکار تقسیم می‌شود که در حالت خودکار کنترل مستقیم روی آن وجود ندارد یا اینکه کنترل خیلی کمی وجود دارد اما در حالت دستی نیاز به نظارت و کنترل مستقیم بر روی رفتار ربات وجود دارد. (Biggs, G., & MacDonald, B., 2003)

یکی از مشکلات، کمبود استانداردهای جهانی برای زبان روبات‌ها است، بنابراین اگر ربات در کارخانه‌ها استفاده شود، یا بایستی کاربران برای برنامه ریزی ربات آموزش داده شوند یا کارخانه مبلغ اضافی برای توسعه زبان ربات پرداخت کند. (Biggs, G., & MacDonald, B., 2003)

در اینجا مفهوم *CIC* طیف گسترده‌ای از ربات‌های هوشمند است که می‌توانند بارهای سنگین را حمل کنند (Balaguer, C., Gambao, E., Barrientos, A., Puente, E. A., & Aracil, R., 1996). مانند چندین جرقیل خودکار و روبات‌های متحرک. این ایده به طرق مختلف توسعه یافته است. با این حال، این نوع ربات‌ها به عنوان ربات واقعی شناخته نمی‌شود و حمل و نقل آن‌ها نیز یک چالش بزرگ است و راه حلی که پیشنهاد می‌شود این است که ربات‌ها بر روی پلت فرم متحرک مانند کامیون، سکوی بیدک کش یا ربات متحرک مستقل قرار گرفته و حمل و نقل شوند. (Balaguer, C., Gambao, E., Barrientos, A., Puente, E. A., & Aracil, R., 1996)

مانع اصلی یکپارچگی عملکردی در سایت، ناکافی بودن کل فرآیند تولید برای نیاز به اتوماسیون و ساخت مفهوم *CIC* است. (Balaguer, C., Gambao, E., Barrientos, A., Puente, E. A., & Aracil, R., 1996) در صنعت رباتیک برای آسان کردن فرآیند ساخت و کاهش هزینه‌ها، المان‌ها و ماژول‌ها طراحی خاصی دارند. طراحی باید ساده باشد، تا مشکلات نگهداری و چرخش کاهش پیدا کند. اگر مونتاژ ثابت بماند، هزینه‌ها در کل فرآیند ساخت و ساز کاهش خواهد یافت. (Bock, T., 2008)

۶- نتیجه

پس از مطالعه مبحث ساخت و اتوماسیون رباتیک می‌توان نتیجه گرفت که ساخت رباتیک می‌تواند در محل یا خارج از محل و یا در کارخانه انجام شود که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. از مزایای ساخت خارج از محل می‌توان به کنترل و نظارت بر ساخت و کیفیت تولید و ساخت اشاره کرد. اشکالات ساخت و ساز خارج از محل مشکلات در حمل و نقل ماژول‌ها به سایت است. اشکالات ساخت در محل این است که برخی از ربات‌ها بزرگ و سنگین هستند و مشکل اصلی در حمل و نقل و انتقال این ربات‌ها به محل سایت است که این مشکل با استفاده از پلتفرم‌های متحرک برای انتقال ربات حل خواهد شد. مشکل دیگر زبانی است که ربات‌ها بر اساس آن هستند، گاهی اوقات یک زبان برنامه نویسی ربات برای کاربران مشکلی ایجاد نمی‌کند، اما گاهی اوقات به دلیل کمبود دانش کافی در زمینه زبان مشترک بین المللی، کاربران با مشکل مواجه خواهند شد. در این شرایط، یک کارخانه‌بایستی متحمل هزینه اضافی برای افزودن زبان جدید به منظور برنامه ریزی ربات گردد. یکی از مزایای ربات‌ها این است که به معماران این آزادی را می‌دهند که در هر هندسه‌ای که می‌خواهند طراحی کنند، هندسه پیچیده و منحصر به فردی که می‌توانند فرم را در ساخت و ساز پشتیبانی کنند. اما بهتر است یک الگوی ساده و واضح برای ساخت داشته باشید زیرا به کاهش هزینه‌ها و ائتلاف مصالح کمک می‌کند تا در ساخت دچار مشکل نشوند. مورد دیگری که در ربات‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد بازوهای آن‌ها برای چرخش است که در حالت چرخش ۶ بازو بهتر است. اگرچه با پنج بازو می‌توانند در برخی فرآیندها کار کنند و مشکلی نداشته باشند و برای برخی عملکردهای چرخشی دیگر به آزادی بیشتری نیاز دارند. هرچه ربات‌ها بزرگتر باشند، حمل و نقل آنها در سایت دشوارتر است، که با صفحات متحرک قابل حمل تا حدودی برطرف می‌شود. پس از تمام مزایا و معایبی که ربات‌ها برای ساخت و ساز پیش ساخته در قرن جدید به ارمغان می‌آورند، معماری را مجذوب خود کردند، زیرا در حضور آنها، دخالت انسانی کاهش یافته و می‌توانند در وقت نیروی انسانی صرفه‌جویی خواهد شد. و در حالت کلی، روباتیک و اتوماسیون شرایط ساخت و ساز را بهبود می‌بخشد.

1. Braumann, J., & Brell-Cokcan, S. (2012). Real-time robot simulation and control for architectural design.
2. Brell-Cokcan, S., & Braumann, J. (2010). A new parametric design tool for robot milling.
3. Braumann, J., & Brell-Cokcan, S. (2011). Parametric robot control: integrated CAD/CAM for architectural design.
4. Biggs, G., & MacDonald, B. (2003, December). A survey of robot programming systems. In Proceedings of the Australasian conference on robotics and automation (pp. 1-3).
5. Balaguer, C., Gambao, E., Barrientos, A., Puente, E. A., & Aracil, R. (1996, June). Site assembly in construction industry by means of a large range advanced robot. In Proc. 13th Int. Symp. Automat. Robotics in Construction (ISARC'96) (pp. 65-72).
6. Bock, T. (2008). Construction automation and robotics. Robotics and automation in construction, 21-42.
7. Braumann, J., & Brell-Cokcan, S. (2012). Real-time robot simulation and control for architectural design. analysis, Journal of Strategic Information Systems 8 .pp. 263–283.
8. Eversmann, P., Gramazio, F., & Kohler, M. (2017). Robotic prefabrication of timber structures: towards automated large-scale spatial assembly. Construction Robotics, 1(1), 49-60.
9. Hewitt, M., & Gambatese, J. (2003). Automation consideration during project design. NIST SPECIAL PUBLICATION SP, 197-204
10. Huang, Y., Carstensen, J., Tessmer, L., & Mueller, C. (2018, September). Robotic extrusion of architectural structures with nonstandard topology.
11. Menges, A. (2011). Integrative design computation: Integrating material behaviour and robotic manufacturing processes in computational design for performative wood constructions.
12. Robotic fabrication in architecture, art and design (pp. 377-389). Springer, Cham
13. Richard, R. B. (2005). Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. Automation in construction, 14(4), 442-451.
14. Schoenborn, J. (2012). A case study approach to identifying the constraints and barriers to design innovation for modular construction (Doctoral dissertation, Virginia Tech)
15. Spong, M. W. (2005). Seth. Hutchinson, and M. Vidyasagar. Robot modeling and control.
16. Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2020). Robot modeling and control. John Wiley & Sons.
17. Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A. A., Gramazio, F., & Kohler, M. (2016). Robotic timber construction—Expanding additive fabrication to new dimensions. Automation in construction, 61, 16-23.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی