

AIオープンTHEOと同期してバウムクーヘンの表面を整える
デンソーウェアのロボット



株式会社ユーハイム 事例:

世界初のAIバウムクーヘン職人による無人工房を可能にした PCベース統合制御とEtherCATネットワーク

ロボットといえば日本を代表する産業の一つであり生産現場で大量の大型ロボットが整然と並び稼働している様子を思い浮かべる人は多いだろう。もしくは近年のインダストリー4.0の取り組みの中で人と協調して作業を行う協働ロボットをイメージするかもしれない。さらにこうしたものづくりの現場だけでなく、接客や介護などロボットが活躍する場面が近年増えていることは誰しもが感じていることだろう。そんな中、創業100年を超える老舗洋菓子メーカーである株式会社ユーハイム(以下、ユーハイム)が「AIを利用して高品質なバウムクーヘンを焼くロボットTHEO」という非常にユニークなロボットを発表して大きな話題になった。発表当時THEOは様々なメディアで紹介されたが、THEOがベッコフオートメーションの産業用PCと制御ソフトウェアのTwinCATで統合制御されていることはあまり知られていない。THEOが開発された経緯やその目的、今後の構想についてユーハイムの中央工場長の松本氏、顧問の横山氏、そしてAI機能や制御部の開発を行った株式会社松浦電弘社(以下、松浦電弘社)の常務取締役である北野氏に伺った。

バウムクーヘン無人工房開発の経緯

ユーハイムは1909年創業（日本での創業は1922年）の老舗洋菓子メーカーで2020年3月には製造する過程で添加物を一切使わない「純正自然宣言」を発表したことで知られる。ユーハイムの代名詞と言えば「バウムクーヘン」だが、ドイツの国家資格である「マイスター」の称号を持つ社内のバウムクーヘン職人が創業以来同じレシピを大切に守り続けている同社にとってアイコン的な存在である。そんな大切なバウムクーヘンをAIを搭載したロボットに作らせるという意欲的な取り組みを行った背景にはどういったものがあったのだろうか。

元々はユーハイム社長の河本英雄氏の想いから始まった、と松本氏は語る。河本氏が南アフリカのスラムを訪れた際に、こうした地域に住んでいる人々、特に子どもたちに美味しいお菓子を食べさせてあげたいという想いを強く持ったという。しかし、日本から南アメリカにバウムクーヘンを届ける事を1回はできても継続するのは大変である。また、外部からバウムクーヘンをスラムに持ち込まないでほしいということも現地から言われた。スラムの経済圏を壊さないためには、現地の店から買って子どもたちに提供する必要がある。現地に機械があり、生地の原材料を現地で用意できればバウムクーヘンを永続的に子どもたちに提供することができる。バウムクーヘンを焼くには高度な技術が必要だが、オープンの状態を数値化して遠隔地からリモートで操作できる仕組みがあればユーハイムの職人が現地の機械を使ってバウムクーヘンを作れるかもしれない。こうしてTHEOの開発が始まった。

THEOの開発が進められる中、ユーハイムは名古屋・栄に新しく食の未来をテーマにした複合施設「BAUM HAUS（バウムハウス）」を作る計画があり、その目玉として来店したお客さんから見てもらえるオープンな場所にショールーム的な役割として近未来のお菓子工房を作ってみてはどうだろう？というアイデアが河本氏から出たという。ちょうどTHEOのプロジェクトとしてバウムクーヘンを作る工程の様々なデータを数値化していく取り組みが進められていたが、それを発展させてTHEOを使ったロボットによるバウムクーヘンの無人工房の計画が発案された。通常は人が運んでいる生地の入った容器や芯棒をコンベアで自動搬送し、垂直多関節ロボットのアームがオープンにセットすれば無人化は可能だが、オープンで美味しいバウムクーヘンを焼く作業は職人でなければできない領域のため、THEOをAI化して学習した職人の作業を再現することで全工程の無人化を実現した

バウムハウスのオープンスペースから見たバウムクーヘンの無人工房



のだ。まだ誰も実現したことのないバウムクーヘン職人のAI化という大きな課題のため、ユーハイムはこの分野で開発経験が豊富な松浦電弘社に開発を依頼した。無人化のために導入する予定だった株式会社デンソーウェーブ（以下、デンソーウェーブ）の垂直多関節ロボットの制御においても松浦電弘社は豊富な経験を持っていたことから、最適な選択だったと言えるだろう。

THEOによる無人工房のシステム概要

バウムハウスで稼働している無人工房のTHEOのシステムについて北野氏に聞いた。バウムハウスのシステムは3台のTHEOとデンソーウェーブの垂直多関節ロボット1台、生地の容器とロールを搬送するコンベアの動作すべてを1台の産業用PC（以下、IPC）で制御している。採用しているIPCはベッコフオートメーションのC6030-0060だが、CPUにCore™ i7を搭載しているため複数台の機械の統合制御を行っても十分余裕がある。もちろん、オープンの回転や扉の開閉、コンベアの動作や垂直多関節ロボットの制御用ネットワークにはEtherCATが用いられている。

改めてシステムの動作について簡単に説明しておこう。このTHEOは実は完全な無人システムではなく、バウムクーヘンの生地と芯棒を準備してコンベアに載せる所まではオペレータが行う必要がある。前述した通りシステム全体はIPCで統合制御されているものの、オペレータが直接IPCを操作する必要はない。操作しやすいGUIが表示される専用タブレットPCとIPCがネットワーク接続されており、ここからIPCをリモート接続して操作する。操作は非常にシンプルで、GUIの表示に従って使用するオープンを1番～3番の中から選択し、運転開始ボタンを押すだけである。あとは自動的にコンベアが生地の容器および芯棒を規定の位置まで搬送してロボットが掴んでオープンにセットし、オープンに搭載されたAIの機能で最適な焼き加減で焼き上がるのがこのTHEOのシステム概要だ。



バウムハウスのオペレータが操作する専用タブレットの操作画面

北野氏曰く、ベッコフオートメーションのIPCと制御用ソフトウェアTwinCATを使うメリットはWindowsOSの利便性を最大限活用しながらEtherCATによるリアルタイム統合制御が実現できる点にあるという。本システムではTwinCAT3 PLCでコンベアの動作、オープンの回転や扉の開閉をオリエンタルモーターのEtherCAT対応ドライブ+モーターを使って制御しているが、コンベアやオープンの動作とロボットの動作を難なく同期できているのはEtherCATの持つ高度な同期性によるメリットだ。加えて独自のWindowsアプリケーションを同時に使うことも可能であり、専用のGUIを操作することも可能というWindowsPCならではの利便性の高さも両立できる。もちろん、遠隔地からのリモートメンテナンスも可能なのは言うまでもない。

THEOのAIも同じIPC上でWindowsアプリケーションとして動作している。各THEOに取り付けられた高性能カメラ3台を制御して取り込んだバウム

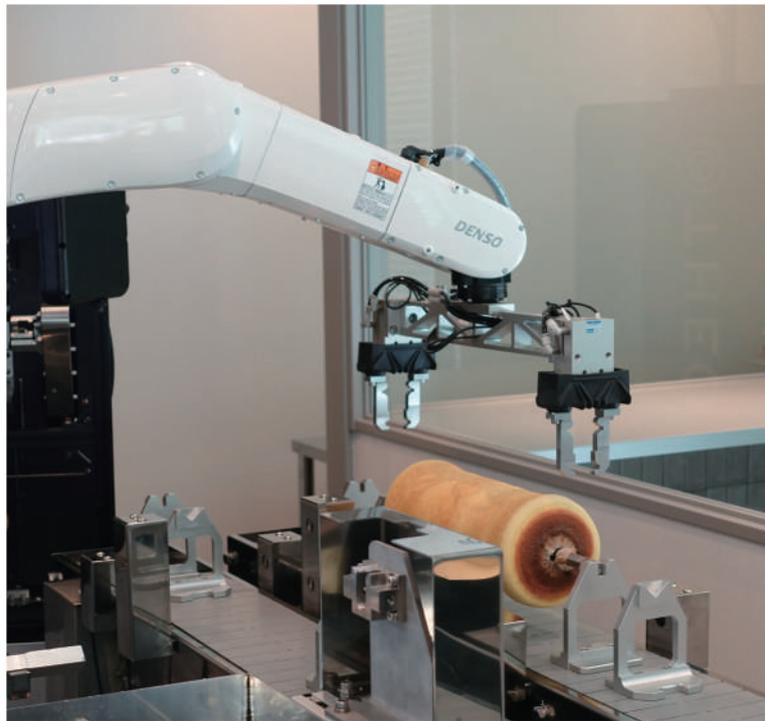
クーヘンの表面画像と、放射温度計など各種センサーから得られる複数のデータを用いたマルチモーダルAIの技術を活用してバウムクーヘンの状態を判断しているのだ。予め高性能なGPUを搭載した別の環境においてPythonで学習させた学習済モデルをIPCに実装し、Windowsアプリケーションからこの学習済モデルをコールしてAIモジュールとして実行している。なお、学習時はカメラ画像の特徴抽出をCNN(畳み込みニューラルネットワーク)で行い、得られた特徴量をその他のセンサーデータと結合して全結合層を通して出力する。出力はバウムクーヘンの焼き上がりを示す0~1の判定値だが、実際に職人がオープンを開けた時を焼き上がり(判定値=1)としてバックプロパゲーションを繰り返してその時間と各種センサーデータ、カメラ画像(バウムクーヘンの表面画像)をネットワークモデルに学習させるプロセスを経て学習済モデルを生成している。

バウムクーヘンは生地を芯棒に付けてオープン内で回しながら焼いて層を作り、またその層の上に生地を付けて焼く、という作業を13層(現行のバウムハウスの場合)になるまで繰り返して作る。層を重ねていけば径が大きくなるためヒーターとの距離が変わり、最適な焼き状態になるまでの時間は都度変化していく。焼き加減を見極めながら慎重にオープンから取り出し、生地を重ねていくという繊細な作業が求められるのだ。さらに、綺麗な筒状のバウムクーヘンを作るために、表面に凹凸が出来てしまった場合はそれをヘラで均一になるように均すという作業も必要になる。経験を積んだ職人でなければ難しいこの繊細な一連の作業をロボットが自動で行うというのだから、いかにTHEOのAIが優れているかよく分かるだろう。前述したようにTHEOに搭載されたAIはカメラで撮影した画像データと複数のセンサーデータを用いてリアルタイムでバウムクーヘンの状態を判断する。AIによりその層の焼き加減が最適な状態だと判断された場合、即座に制御側にフィードバックされてTwinCATでオープン内の回転停止、扉を開いてバウムクーヘンを外に取り出す制御が実行される。データが学習済モデルに入力されて推論が出力、制御にフィードバックされるまでの時間は100~200ms程度と非常に高速な動作が実現できているが、これもAIの推論およびPLC制御がIPC一台に統合されているメリットと言える。また、次の工程では再び生地を付けてオープン内に戻して焼くのだが、生地を一周回しながら付ける際にバウムクーヘンの高さと同様にTwinCATで制御されているため、人が生地を付けるよりも正確に「同じ位置で一回転」して必ず同じ量の生地を付けることができる。付ける生地の量を正確に維持できれば、原材料を無駄にすることを防ぎ、かつ一定の品質のバウムクーヘンを作ることに繋がる。「この点では職人よりもAI(THEO)の方が優れたバウムクーヘンの作り手」だと北野氏は語る。また、人がやるのと同様にバウムクーヘンの表面にできた凹凸を均す作業もデンソーウェーブの垂直多関節ロボットが行う。THEOのオープンから外に出されたバウムクーヘンの表面をロボットのアームで保持されたヘラで均一に均すのだが、それぞれの動作を完璧に同期して制御できるからこそ実現可能な作業だ。優れた同期性を持つEtherCATの利点を最大限に活かして実現したのがこの近未来のお菓子工房なのだ。

ちなみに職人の焼き方から十分な学習用データを取得するには通常であれば5~6本のバウムクーヘンを焼く必要がある。職人によっては癖や条件などによって学習データにバラツキが出る場合もあるらしく、そういった場合はもっと多くの本数のデータが必要になる。1本あたり30分程度で焼き上がるため、おおよそ3時間程度あれば学習データの取得は完了するということだ。もちろん、単に学習データを取得するだけではなくそれらのデータを用いて学習済モデルを生成する(学習する)ことが重要なのだが、バウムクーヘン5~6本という比較的少ないデータから汎用性のあるAIにするための教師データの工夫を行い、学習が適切に収束しているかの確認を含めてもおおよそ20時間程度の作業時間があればAIとして使える状態になるという。なお、当然ながら「焼く」以外の条件は同一にしなければならぬため、使用する生地の種類は一種類に限定される。言い換えれば、別の生地を使いたければその生地を使って学習データを取得すれば良いだけなので、(理論的には)約24時間あれば異なる生地でも職人レベルのバウムクーヘンが誰でも焼けるようになる。河本氏が目指した「南アフリカの子どもたちにバウムクーヘンを食べさせる」を実現するために非常に重要なポイントと言える。



バウムハウスのTHEOの制御盤の一部
C6030-0060でオープン、ロボット、コンベアなどすべてのシステムが制御されている



焼き上がったバウムクーヘンをロボットがオープンからコンベアまで運ぶ

こうして稼働開始したバウムハウスのTHEOだが、本格稼働してから約半年間経過しているもののこれまで一度もブルースクリーンなどの致命的なエラーは発生していないという。また、運用していく中で実際に操作をしているオペレータの感想をフィードバックしてGUIをより使いやすい形に改定したり、最も効率の良いオペレータの導線を模索してセーフティライトカーテンの位置やコンベアの配置を変更するなどシステム構成を作り変えながら最適化を行い、現在の姿にまで進化している。運用開始後でもこうした最適化に対応できたのは、トポロジーの自由度が非常に高いEtherCATの特徴に加えて、システム構成の変更にも柔軟に対応できるTwinCATの良さがあつたからとも言えるだろう。もちろん、ベッコフオートメーション製IPCが統合コントローラーとして安定した性能を持っていることがすべての基本になっている。

現在稼働しているTHEOのシステムであれば、全く経験のない人でもマイスターの職人が作るのと同じレベルのバウムクーヘンを作ることができる。実際、バウムハウスではアルバイトの人が1~2人だけでTHEOを使ってバウムクーヘンを作っているとのこと。



バウムハウスの無人工房は3台のTHEO(オープン)と1台のロボット、コンベアで構成される

ベッコフのIPCとTwinCATにより様々なセンサーデータをリアルタイムにフィードバックしてAIの推論と複数の機械の同期制御が実現している

THEOの今後について

オープンとコンベア、垂直多関節ロボットを組み合わせた無人工房は現在バウムハウスにしか無いが、AIを搭載したオープンの部分だけのTHEOは複数台全国で稼働している。THEOはロボット(オープン)を無償で店舗などに貸与してバウムクーヘンを焼いた本数に応じて費用をチャージするサブスクリプションモデルのビジネスだ。オープン単体のため生地や芯棒を運んだりオープンにセットするのはオペレータがやる必要があるものの、焼く工程はバウムハウスのTHEOと同じAIによって制御されるためほぼ同じ品質のバウムクーヘンを作ることができる。(バウムクーヘンの表面の凹凸を均す機能も付いていないため品質は同じではない)。

ユーハイムは今後国内に加えて海外にもTHEOを展開していく予定で、今年度(2021年度)内だけで30台の出荷を予定しているという。河本氏の目的は南アフリカのスラムにTHEOを設置することだが、まだ達成できていない。今年度中の計画には海外(ヨーロッパ)への出荷も予定されているため、それを足がかりに次はいよいよ南アフリカに進出する予定だ、と松本氏は語る。

ただ、永続的に現地でTHEOを稼働させて品質の高いバウムクーヘンを提供するためには現地で生地を調達することが必須条件になるため、これが現状の課題とのこと。日本で入手できる原材料とは全く異なる材料を使って、できるだけ簡単に誰でも均一な品質で生地を作れるように設計しなければならないからだ。当然、生地が変われば既存の学習済モデルは使えないが、新しい生地で学習モデルを作れば良いだけなのである程度職人が時間をかければ現地に対応したAIを準備することはできる。現地に適した生地をそれぞれ開発するという課題はあるものの、それさえできればどんな地域であっても誰でも高品質なバウムクーヘンを作れる、というのがTHEOの最大の魅力だろう。

このまま計画通り進めば、そう遠くない日に南アフリカの子どもたちにバウムクーヘンを食べさせるために機械を置くという河本氏の目標は達成されるだろう。一方でバウムハウスの無人工房はTHEOのフラッグシップとして今後も新しい取り組みを続けていく予定とのこと。チョコレートを使った新しい生地を使ったバウムクーヘンを作るAI学習モデルや、小型の垂直多関節ロボットを使ったシステムも検討されているようだが、ベッコフオートメーションとパートナー企業である松浦電弘社は、今後もユーハイムの意欲的で独創的な取り組みに対して最大限のサポートを続けていく予定だ。



ユーハイムの中央工場長の松本氏(写真右)と顧問の横山氏(写真左)

BECKHOFF

ベッコフオートメーション株式会社

■ 横浜オフィス

〒231-0062 神奈川県横浜市中区桜木町1-1-8 日石横浜ビル18階
電話: 045-650-1612

■ 名古屋オフィス

〒453-6123 愛知県名古屋市中村区平池町4-60-12
電話: 052-433-2256

E-mail: info@beckhoff.co.jp URL: www.beckhoff.co.jp

Beckhoff®, TwinCAT®, EtherCAT®, EtherCAT P®, Safety over EtherCAT®, TwinSAFE®, XFC®, XTS®, および XPlanar® は、Beckhoff Automation GmbHの登録商標です。
このカタログで使用されているその他の名称は商標である可能性があり、第三者が独自の目的のために使用すると所有者の権利を侵害する可能性があります。
© 08/2021 Beckhoff Automation K.K., Nisseki Yokohama Building, 18th Floor, 1-1-8 Sakuragicho, Naka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa-ken 231-0062, Japan

この記事に掲載されている写真の著作権は、ベッコフオートメーション株式会社にあります。写真の一部またはすべてを許可なく複製、転載、改変、頒布するなどの行為は著作権法により罰せられます。