

デジタルトリプレットを活用した 作業員支援システム

佐藤 剛*
Go Sato
梅田 靖†
Yasushi Umeda
谷川民生‡
Tamio Tanikawa

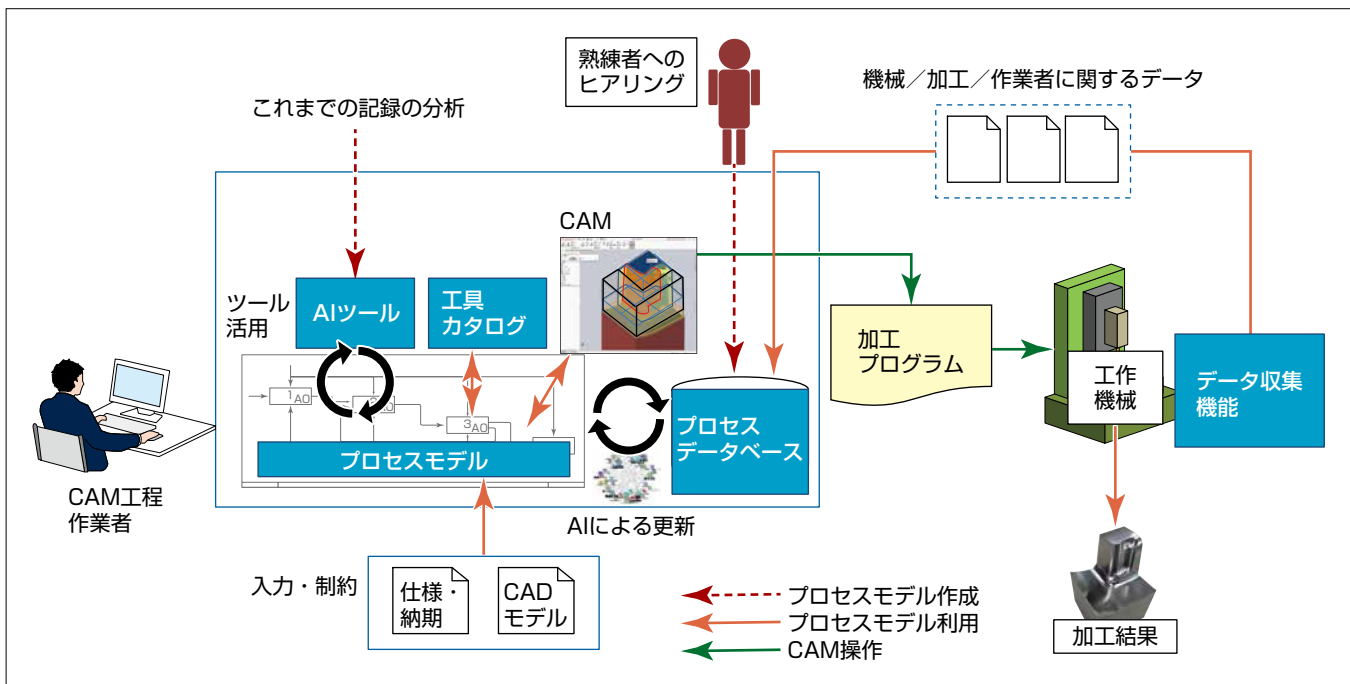
Worker Support System Utilizing Digital Triplet

要 旨

近年、Industry4.0に代表されるように生産システムをサイバー化してデジタルツインを構築し、予防保全や生産性向上のためにAIやシミュレーションを活用する試みが進んでいる。しかしながら、これらの試みでは、日本の製造業の強みであり、生産性向上に寄与し、他社との差別化による競争力強化につながる現場のカイゼンや熟練者の暗黙知を活用できる枠組みにはなっていない。そこで、人がデータから価値を生み出す知的活動世界をデジタルツインと一体で構築し、設計から生産、使用、メンテナンスなどのエンジニアリングチェーン全体で人のエンジニアリング活動を支援する“デジタルトリプレット(以下“D3”という。)”が提唱されている。D3では、知的活動を自動化するシステムを構築するのではなく、作業員の支援を行うシステムを構築し、作業員自身が知的活動の中心になる。

今回の作業員支援システムの開発では高度な金型製作を題材として、D3の考え方にに基づき、作業員の暗黙知の形式

化と作業員の支援を実現するシステムの構築を目的にした。D3で、作業員の知的活動をプロセスモデルとして記録するための汎用的な記述言語PD3(Process Modeling Language for D3)を策定した。金型製作の工程の一つである“CAM(Computer Aided Manufacturing)工程”は工作機械で加工するためのプログラムを作成する工程であるが、製品の要求仕様を達成するための加工法や加工条件を決定する重要な工程であり、後工程への影響も大きい。そのため、この開発ではCAM工程を作業員支援の対象にした。CAM工程の作業をPD3によってプロセスモデルとして記述し、そのプロセスモデルを実装した作業員支援システムを構築した。非熟練者のCAM工程を支援するケーススタディで、非熟練者が作業員支援システムで学習することで適切な加工工程を設計可能になることを確認した。この結果から、試作回数の削減や材料廃棄の低減といった加工工程のロスの削減、非熟練者への知識伝達の見込みを得た。



D3を活用した作業員支援システム

この開発では、D3の考え方にに基づき、金型製作のCAM工程(工作機械で加工するための加工プログラムを作成する工程)を支援する作業員支援システムを構築した。

1. ま え が き

近年、Industry4.0に代表されるように、生産システムをサイバー化してデジタルツインを構築し、予防保全や生産性向上のためにAIやシミュレーションを活用する試みが進んでいる。しかしながら、これらは日本の製造業の強みである現場のカイゼンや熟練者の暗黙知を活用できる枠組みにはなっていない。このため、人がデータから価値を生み出す活動を行う“知的活動世界”をデジタルツインと一体で構築し、設計から生産、使用、メンテナンス、資源再利用などのエンジニアリングチェーン全体で人のエンジニアリング活動を支援するD3が提唱されている⁽¹⁾。

高度な金型製作を題材としてD3の考え方に基づいて、作業者の暗黙知の形式化及び作業者の支援を実現するシステムの構築を目的として研究開発を行った。開発したシステムによって、加工工程のロスの削減による生産効率の改善、さらには高度加工技術ノウハウの知財化等によるグローバル競争力強化に寄与することを目指している。

2. D3

D3は物理世界・サイバー世界から構成されるデジタルツインに、三つ目の階層である作業者がデータから価値を創出する活動を行う“知的活動世界”を加えて構成される。D3での“知的活動世界”では、知的活動を自動化するシステムを構築するのではなく、作業者の支援を行うシステムを構築し、作業者自身が知的活動の中心になる。

D3上での作業者は、図1に示すように、“①データ収集”、種々のAIツール、シミュレータなどのソフトウェアツールを活用した“②情報分析”、作業者による“③意思決定”及び物理世界での計画の“④実施”に相当する“エンジニアリングサイクル(知的活動のプロセス)”を通じて、データから価値を創出する。

これまでの生産システム作業者は、物理世界だけでエンジニアリング活動を行っていたため、知識、経験が人に蓄積されていくのに対して、D3ではエンジニアリングサイクルを行う際の作業支援を通じて、エンジニアリングサイクルを実施する手順がプロセスとして記録されるなど、エンジニアリング活動の記録(動態保存)が可能になる。このようにエンジニアリングサイクルを動態保存し、アーカイブ化することで、再利用、他製品や教育への展開、知識化への活用が期待される。

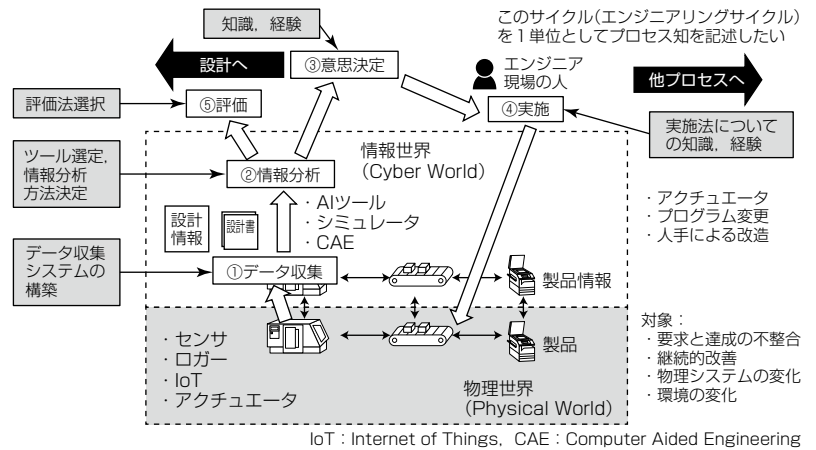


図1. D3でのエンジニアリングサイクル⁽¹⁾

3. 金型製作での作業支援

3.1 作業支援の対象とする工程

金型製作は、図2に示すように、受注から出荷までの複数の工程に分割されている。この開発では、実証フィールドとした金型製作工場での過去の不良事例分析から、特にエラーが生じやすく、後工程への影響が大きい“CAM工程”を作業支援の対象とすることにした。

“CAM工程”は、CAMソフトウェアを用いて、設計工程で作成したCADモデルの形状に基づき、工作機械を動作させる加工プログラムを作成する単純な工程に見えるが、製品の要求仕様に対して金型に求められる精度や納期を達成するための加工条件や加工順番を作業者が決定する重要な工程になっている。特に、加工条件や加工順番の決定の際に、作業者は加工不良の有無や加工精度を個人の経験に頼った予測を行い、作業者ごとに異なる判断を行っている。

作業者の予測に不足や失敗があると、加工不良が生じて再加工など手戻りが生じる。現状のCAMソフトウェアでは加工現象を考慮し、加工精度などを判断するための機能がないことが一般的である。この開発では、CAM工程での作業者の判断の個人差や予測の失敗といった課題を解決するため、作業支援システムを構築する。

3.2 D3フレームワークでのプロセス記述方法

D3では作業者の知的活動を“動態保存”し、参照、検索、他者と共有できる仕組みを構築する必要がある。そこで作業者の知的活動をプロセスモデルとして記述するための記述言語に必要な13項目の要件を決定し、記述言語PD3を策定した。これは、IDEF0(Integrated Computer Aided



図2. 金型製作の工程

Manufacturing DEfinition for Function Modeling 0)を改良した汎用的なプロセス記述言語である。

図3にPD3の記述例を示す。プロセスモデルの最小単位である工程は、図3(a)のように入力、出力、ツール、考え方、根拠の5種類の情報によって定義され、記述の具体例を図3(b)に示す。各作業のプロセスモデルは工程の入出力を連鎖させることで表現される。入力、出力はデータによって定義され、ツールはその工程を行う上で利用されるもので、CAMやシミュレーションなどのソフトウェア、工具カタログなどの参照データ、加工機などが含まれる。考え方は、工程を実行する際にどのようなことを考慮する必要があるかを記述する部分であり、根拠には、その工程の出力の採択理由を記述する構成になっている。

3.3 作業支援システム

図4に作業支援システムの全体図を示す。このシステムには主に二つのモードがあり、CAM工程を例にして次に述べる。

一つは知識獲得モードであり、過去の加工記録の参照、熟練者へのヒアリングなどによって情報収集と分析を行い、熟練者による標準的な作業のプロセスモデルをプロセス記述言語PD3で作成する。

もう一つのモードは作業支援モードであり、作成したプロセスモデルに沿ってCAM工程作業を行うことで、非熟練者であってもより品質の高い加工プログラムを作成できるようになる。プロセスモデルに沿って作業を進めることで、各工程でどのようなツール(カタログ、シミュレータ等)を使って、何を基準にどのように判断をすればよいか分かり、適切な意思決定を行うことができる。

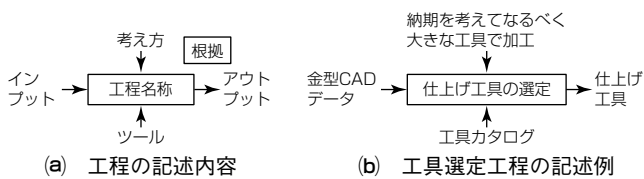


図3. プロセス記述言語PD3の記述例

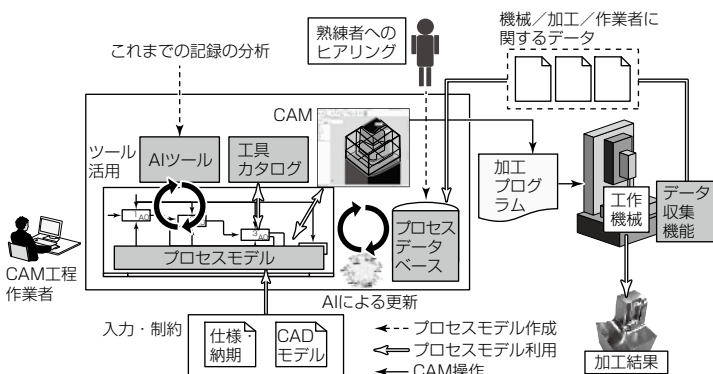


図4. 作業支援システム

また、作業者が作成した加工プログラムで加工不良が生じるとツールで判断した場合、問題の箇所に類似する過去の作業事例を検索し、過去の問題とその対策を確認して加工プログラムを修正し、ツールでの修正結果の確認ができる。

作成した加工プログラムで加工を行う際には、データ収集機能によって位置などの機械に関するデータ、切削音などの加工に関するデータ、操作履歴などの作業に関するデータを時刻同期して収集する。

これらの作業時のプロセスモデルと加工時のデータを合わせて、プロセスデータベースに蓄積する。AI技術等を活用して、蓄積された記録の検索や、これらを学習して新たな知識獲得を行うことも可能であると考えられる。

4. 作業支援システムを用いたケーススタディ

4.1 実証フィールドでのプロセスモデルの構築

CAM工程経験20年以上である複数の作業員に対してヒアリングを行い、実証フィールドでのCAM工程のプロセスモデルを構築した。

CAM工程で、作業員はCAMソフトウェアで加工プログラムを生成する前に工具の動きをイメージし、そのイメージに従って加工プログラムを生成し、実際に合わない部分はイメージから修正して生成していることが分かった。さらに通常、CAMソフトウェアでは素形材(加工前の形状)から、加工と同じ手順(荒加工、中仕上げ、仕上げの順)で加工プログラムを生成していく。しかし、作業員は工具の動きをイメージする場合、CAMソフトウェアの作業とは逆の順で最終形状から仕上げ、中仕上げ、荒加工の順にイメージしており、複数の作業員に共通した考え方であった。工具の動きをイメージするプロセスは作業員の頭の中で行われ、電子データなどに記録されないプロセスであった。工具の動きをイメージするプロセスはCAM工程の重要な一部であるため、ツール等によって記録して作業員支援に活用することが重要である。

このことから、CAM工程での複数の作業員に共通する標準的な作業をPD3で記述したプロセスモデルを図5に示す。図5では全体の工程の流れだけ示しているが、各工程の入力、出力、ツール、考え方、根拠も抽出してプロセスモデルを記述している。図5で点線から上側は工具の動きをイメージする工程であり、下側は実際にCAMで作業する工程である。各工程は、仕上げ加工などの加工の種類や際(キワ)、一般面といった加工部位に細分化されている。際とは、面と面のつなぎ目の部分を指し、特に加工プログラム作成で作業員が注意しているため、別の工程に

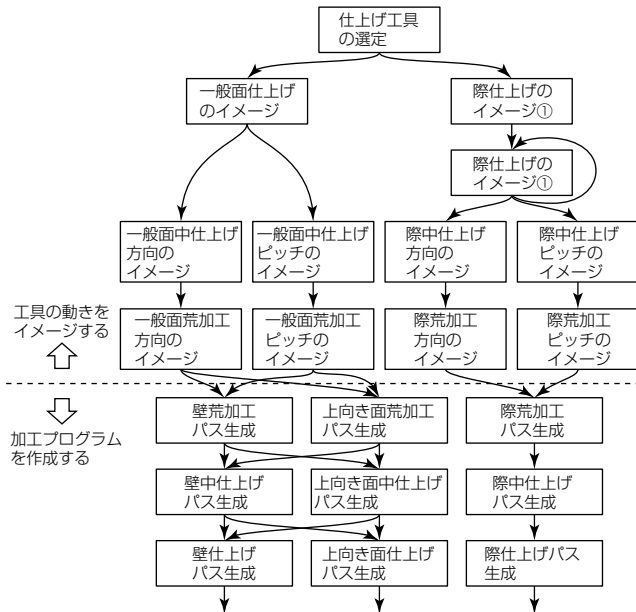


図5. CAM工程のプロセスモデル

なっている。

ヒアリングの対象になった作業者に図5のプロセスモデルとCAM工程での思考過程が合致しているかを確認し、“思考過程の整理ができてい”との評価を得た。

4.2 CAM工程での作業支援システムの評価

構築したプロセスモデルを実装した作業支援システムを用いて、適切な加工工程を設計できるかという観点で、非熟練者に対する作業支援の効果検証を実施した。CAM設計経験が1年未満の非熟練者を被験者として、典型的な加工不良である際の食い込みが生じているワーク(図6)を対象にした。

図7に作業支援システムによる支援がない場合と支援がある場合に設計された加工工程を示す。図7で実証フィールドの熟練者が指摘した主な点は次のとおりである。

(1) 支援なし(図7左欄)

- ① 工具の選択が適切ではなく、図面どおりの加工ができない
- ② 各工程での工具負荷が大きく、仕上がり品質が悪い

(2) 支援あり(図7右欄)

- ① 図面どおりの形状が加工できている
- ② 工具負荷を考慮している
- ③ 工程の順序がおかしい(工程8～9は工程2～3の次)

さらに、熟練者によって、“仕上がり品質”“加工形状”“加工順番”“加工時間”の四つの指標で各加工工程の評価を実施した。各項目10点満点で採点した結果、作業支援システムによって2点から11点(40点満点)まで改善でき、支援によって適切な設計に近づいていることが確認できた。これは作業支援システムによって作業の全体像を理解し、それぞれの工程での考え方を理解できたためであると考えられる。

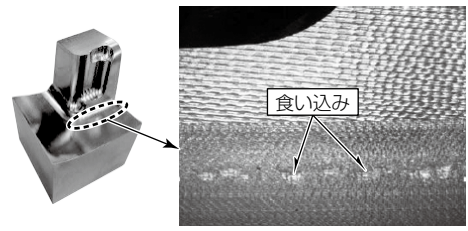


図6. ケーススタディに使用したワーク

内容	支援なし		支援あり	
	加工イメージ	使用工具	加工イメージ	使用工具
工程① 荒加工		直径16mm ラジアスエンドミル	工程① 荒加工	直径16mm ラジアスエンドミル
工程② 中仕上げ	<p>×樹脂の流れる方向と異なる</p> <p>直径12mm ボールエンドミル</p>		<p>○樹脂の流れる方向に加工</p> <p>直径12mm ボールエンドミル</p>	
工程③ 仕上げ			<p>○工程分割によって工具負荷小</p> <p>直径4mm ボールエンドミル</p>	
工程④ 仕上げ	<p>×適切な工具径が選択されていない</p> <p>直径7.5mm ボールエンドミル</p>		<p>直径1mm ボールエンドミル</p>	
工程⑤ 仕上げ	<p>ワークの向きを変更</p> <p>直径16mm ラジアスエンドミル</p>		<p>×加工順序が不適切 干渉の可能性あり</p> <p>直径4mm ボールエンドミル</p>	

図7. ケーススタディで設計された加工工程

一方、支援システムを用いた場合でも非熟練者が誤った判断を行うケースが散見された。これは、プロセスモデルとして熟練者からのヒアリングから抽出しきれていない知識に起因する判断ミスであり、プロセスモデル及びプロセスモデルの作成方法の改良が必要である。

5. むすび

D3の考え方に基づき、金型製作のCAM工程を支援する作業支援システムを開発した。ケーススタディの結果から、非熟練者が学習してより適切な加工工程を設計することが可能になり、加工工程のロスの削減、非熟練者への知識伝達の見込みを得た。

この成果は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP15009)の結果得られたものである。

参考文献

- (1) 梅田 靖：次世代生産システムに向けた「デジタル・トリプレット」の提案, 日本機械学会 生産システム部門研究発表講演会2019, 613 (2019)