

CAD モデルを援用したエンジニアリングプロセス保存手法の提案

Recording of engineer's thought process through integration of process description and CAD model annotation

○近藤伸亮, 成宮 大翔, 馬 国勝, 梅田 靖 (東京大学) *1
西尾 匡弘, 槇野浩司 (トヨタ自動車株式会社) *2

*1 Shinsuke Kondoh, Hiroto Narumiya, Guosheng Ma, Yasushi Umeda, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, kondoh@race.t.u-tokyou.ac.jp

*2 Masahiro Nishio, Kouji Makino, Toyota Motor Cooperation

キーワード: エンジニアリングプロセス, 問題解決知識, 対象知識, デジタルトリプレット

1. 緒 言

Cyber Physical System (CPS) ⁽¹⁾を用いた生産システムのスマート化が加速している。しかし、このような生産システムが対処できるのは事前に発生が予見されている事態のみであり、市場ニーズの急激な変化や原因不明の設備故障等の予測困難な事態への対処は熟練技術者の知識なくして実施するのが難しい。梅田らは人間の問題解決知識と情報システム、物理システムの機能・挙動を統合した人中心のエンジニアリングパラダイムであるデジタルトリプレット (以下、D3) ⁽²⁾を提案し、熟練技術者の知識とデジタルツインを組み合わせて生産システムの様々な課題を柔軟に解決する手法を開発している (例えば3)。

技術者の知識を抽出するためには、個々の問題解決における技術者の思考過程を機械可読・人間可読な形式で、問題解決の個々の状況 (例えば、CPS を構成する設備、ソフトウェアのパラメータ値・状態など) と関連づけて記録・蓄積することが不可欠である。この目的のため、後藤らは技術者の問題解決行為を問題解決層、サイバー層、物理層の三層に渡るアクションの列として表現するプロセス記述言語 PD3 を開発し、PD3 で記録した過去のエンジニアリング事例を参照することで第三者が効果的に問題解決が可能となることを、生産ラインの稼働率向上等の事例を用いて明らかにした(3)。一方、PD3 では個々のアクションで実施された行為を記載しているが、行為が行われた時の生産設備や部品などの状態や意思決定時の状況を関連づけて記録していないことから、PD3 作成者の意図を第三者が理解することが必ずしも容易ではないことが明らかになった。

2. 目的とアプローチ

本研究では、問題解決時に設備や部品等、エンジニアリング対象に対して、設計者がそれらの状態をどのように認識し、どのような判断を行ったかをエンジニアリング対象の表現 (例えば CAD モデル) に直接記述し、これを PD3 と

関係づけることで、上記課題の解決を試み、自動車製造における溶接準備工程を例に有効性を評価することを目的とする。具体的には、(1)自動車の溶接組み立て工程を対象として、熟練作業者が実施した問題解決過程を PD3 で記述し、(2)PD3 上での対象 (例えば、生産設備や部材等) に対する言及を、第三者にも理解可能とするために必要となる表現の種類を同定し、(3)これを対象を表現する CAD モデル上に PD3 から参照可能となるように記述する手法およびツールの開発を行う。

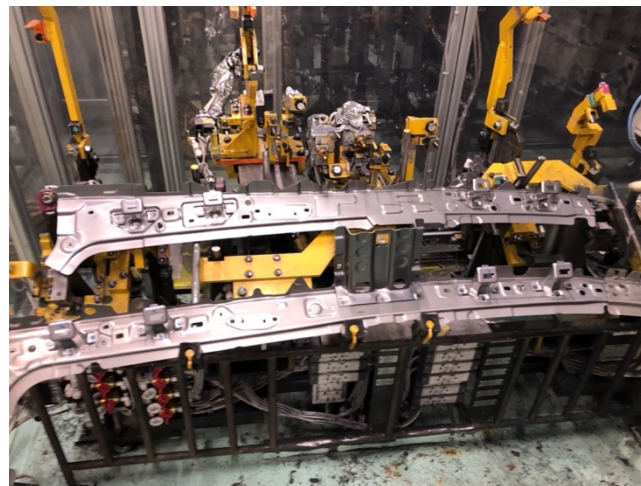


Fig. 1 Jig for welding assembly and panel components (provided by Toyota Motor Corporation)

3. 対象言及知識のモデル化

本章では自動車溶接組み立て工程における基準決定プロセスを例題として、対象言及知識の抽出およびモデル化を行う。

2.1. 基準決定プロセス

自動車溶接組み立て工程とは、薄板をプレス加工して作成した種々のパネル部品をロボットを用いて溶接し、自動車ボディを組み立てる工程である。組み立て精度を満足さ

基準決定プロセスの全体

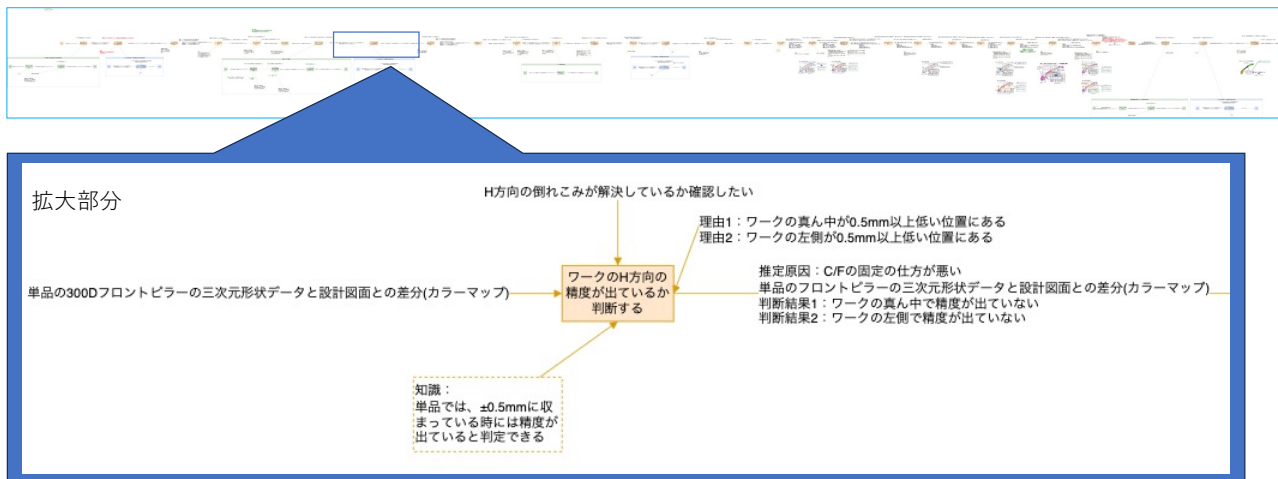


Fig. 2 Design process of reference positioning mechanism for welding assembly

せるためには、パネル部品そのものの加工精度を向上させることに加え、組み付けを行う複数のパネル部品を溶接治具上に適切に配置、固定することが不可欠である。パネル部品を溶接ジグ上のどのような位置で、どのような方法で固定するかを決定する問題が、基準決定問題であり、パネル部品を溶接治具上に固定するピンの位置、および対応するパネル部品の位置（一般的には穴を空ける）の組を基準と呼んでいる。図1にパネル部品とそれを組み付ける溶接ジグの例を示す。

2.2. 基準決定プロセスのPD3による表現

基準決定プロセスをPD3を用いて記述した例を図2に示す。PD3では、技術者が頭の中で考えた問題解決行為を明示化し、これを情報システム上の振る舞い（サイバー層の記述）、設備等の物理的実体上の振る舞い（物理層の記述）と対応づけてエンジニアリングプロセスを記述する。エンジニアリングプロセスは、複数のアクション（図2のオレンジ色の長方形に対応）から構成され、各アクションで取り扱う情報や、決定された内容などは、アクションに入次する、または、アクションから出次するエッジ（図2の矢印）のラベルとして記述する。さらに、アクションを実施する意図をアクションに上方から入次する矢印に記載する。なお、アクションに下側から結合している長方形ノードは、当該アクションで用いた知識やツールなどを表している。例えば、図2の拡大部分に示すアクション「ワークのH方向の精度がでていないか判断する」は、「単品の300Dフロントピラーの三次元形状データと設計図面の差分(カラーマップ)」に対して、「H方向の倒れ込みが解決しているかどうかを確認したい」という意図のもと、「単品では±0.5mmに収まっているときには精度が出ていると判定できる」という知識を参照して、「ワークの真ん中で精度が出ていない」「ワークの左側で精度が出ていない」という二つの判断を下したことが示されている。

2.3. 対象に関する言及の分類

図2に示したアクションにおいて、「ワークの真ん中で精度が出ていない」、「ワークの左側で精度が出ていない」等の対象に関する言及が現れている。しかし、これらの文

字列情報だけでは、ワークのどの部分が、どのように精度が出ていないかを第三者に誤解の余地なく伝えることは困難である。このように、文字列だけで問題解決行為の内容や、その時のエンジニアの意図、ラショナルを十分に表現できない部分をPD3記述から抽出した結果、対象に関する言及は以下の3種類に分類できることがわかった。図3に3種類の言及の例を示す。

- 概念定義
概念定義とは、設備や部品、あるいは、それらを構成する部分等に名前（必要であれば、説明文も付与）をつけて参照する言及である。図3の黄色の長方形ノードで概念定義の例を示す。部品上の部分（赤色の円）に対して、「基準3a」等の名前が定義されている。
- 状態判断
状態判断とは、上記で定義された概念に対して技術者が下した判断や認識に対応する言及である。図3の緑色の長方形ノードに状態判断の例を示す。「一部分に偏っており、バランスを崩しやすくなっている」という状態判断を事前に定義された3つの概念、「基準3f」、「基準3d」、「基準3b」の組に対して下していることを示している。
- 変化定義
変化に関する言及は、概念および状態判断をエンジニアリング行為を通じて変更することに対応している。図3における薄緑色の長方形ノードに変化の例を示す。この例は、概念「基準3f」を概念「基準3f'」へと「位置を移動する」ことで変化させたことを示している。

これらの3種類の言及は図4に示すようにPD3上の関連する文字列からハイパーリンクを介して参照可能な形式で対応づける。これにより、PD3で文字列で言及されている様々な対象について、その全体、部分、重心や断面など対象に関して幾何学的に構成される様々な概念をPD3から直接参照、理解することができるようになる。図4では、「ワークの真ん中で精度が出ていない」という判断の結果について、「ワークの真ん中」が具体的にワーク上のどの部分に対応するかを関連づけて提示する様子を示している。

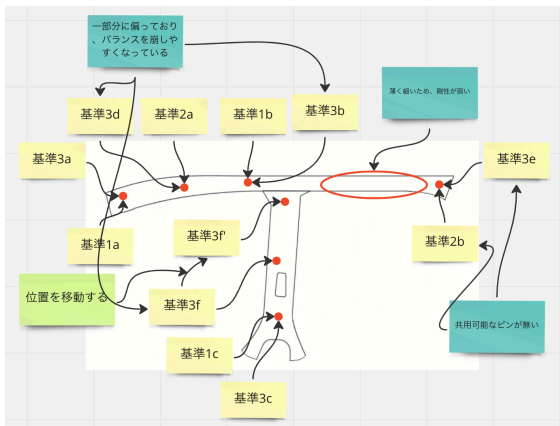


Fig. 3 Three types of references regarding the engineering object

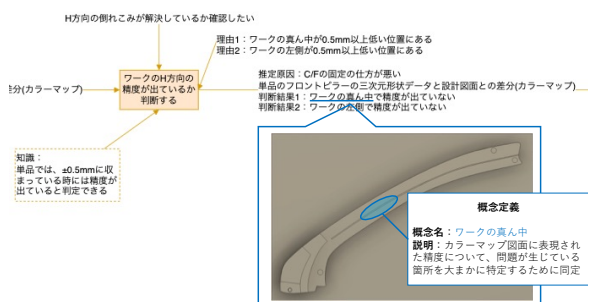


Fig. 4 Integrated description of PD3 and engineering objects

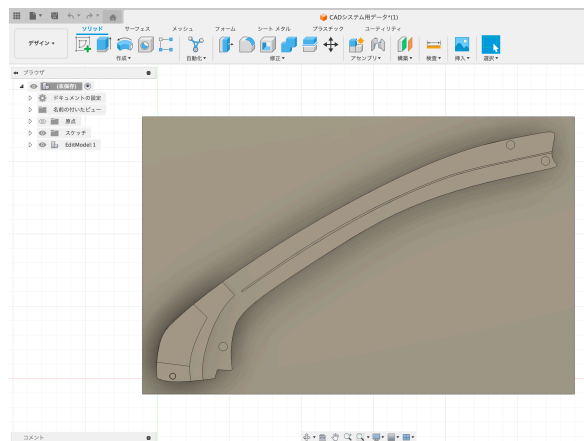


Fig. 5 Screen dump of UAO

3.4. 対象に関する言及の分類

3.3 節で定義した 3 種類の対象言及記述を、第三者に理解可能な形で記録、再現可能とするため、CAD モデルのこれらの言及をアノテーションとして付与、保存、表示可能とする計算機ツール Universal Object Annotator (UOA)を開発した。UOA は汎用 CAD ソフトウェア Fusion360™ 上のプラグインソフトウェアとして開発している。図 5 に UAO の実行画面を示す。ユーザは、CAD モデル上のオブジェクトを選択するか、または、新たなオブジェクトを定義することで概念を定義することができ、定義済みの概念に対し

て注釈をつけることでエンジニアの状態判断を、さらには、2つの概念定義、または状態判断の差分に注釈をつけることで変化についての言及を記録することを想定している。

4. 対象言及知識の評価

第 3 章で述べた対象への注釈付与手法の記述力と有効性を評価するため、第 2.2 節で分析した基準設定課題と同一の課題を二人の熟練技術者（以下、技術者 A,B と呼ぶ）に提示し、それぞれ 1 時間以内に当該課題の解決を依頼した。この時、問題解決に際して考えたことを全て発話するとともに、必要に応じてプリント出力した対象図面に注釈を書くように依頼し、発話内容と注釈を記述する図面を録画記録した。これらをもとに PD3 を用いて技術者 A,B の問題解決行為を復元した。なお、本実験では 3.4 節で述べたツールは、実験を実施しているときには使用せず、実験終了後に、注釈記載用に用意した出力図面に基づいて、注釈内容を UOA 上に記録した。これは、技術者 A,B はともに、UOA の使用に習熟していなかったため、思考過程を妨げない程度に速やかに UOA 上で記録を作成することができないためであった。

表 1 に技術者 A,B が対象に対して言及した概念をまとめる。

Table 1. Three types of references obtained in the case study

	技術者 A, B で共通する対象表現	相違点	
		技術者 A	技術者 B
概念定義	1. 基準	1. 基準3a, 3b, 3c, 3d	1. 真ん中の少し上のあたり
	2. 重心	2. 基準で作る三角形	2. コスト見積もり
	3. プレス品	3. 元々の基準位置から少し上のあたり	3. 真ん中より下のあたり
	4. 管理面	4. 水平面 5. 断面 6. 管理面 7. フランジ部分 8. フランジ部分の真ん中部分	
状態定義	なし	1. 基準3b,3c,3dで作る三角形の中に基準3aが入っている 2. 基準3b,3c,3dで作る三角形の外側に重心が存在している 3. 精度が出されていない箇所である 4. 管理できるような水平面である	1. 倒れ込んでいる部分を支える受け基準が必要 2. 自工程で完結することではない
	変化定義	なし	基準3aを新たな変更先の基準位置に移動する 候補位置に新たな基準を設ける

技術者 A,B は実験中、それぞれ 12 件、7 件の概念定義、4 件、2 件の状態定義、1 件ずつの変化定義を行った。いずれの技術者についても、出力図面を用いて行われた対象への言及は上記 3 種類で対応することができ、本記述手法が表現可能であることが確認できた。

技術者 A,B は 4 件の共通する概念定義（すなわち、基準、重心、プレス品、管理面）を行っている。このように相異なる技術者が共通して言及する概念は、当該エンジニアリング課題において汎用的に用いられる概念であると考えられることができる（実際に当該例題におけるこれらの概念はチー

ム内業務マニュアル等でも言及される汎用概念であった)。基準や管理面等のマニュアルでも言及される汎用的な対象概念を実際の対象と関連づけて整理することは、マニュアル等の理解にも有効であると考えられる。

一方、「基準で作る三角形」という概念は、技術者 A のみが言及する概念であり、「真ん中の少し上あたり」という概念は技術者 B のみが言及した概念であった。このように技術者毎に異なる概念は、技術者が問題を捉える方法、解決案を考える方法に固有の概念であり、問題解決の方法が異なると、技術者が対象を判断、評価する方法も異なることを示唆している。実際に、状態定義および変化について、技術者 A,B には共通する概念がなかった。技術者 A は、「フロントピラーの倒れ込み」という課題に対して、既存の基準を移動させることを考えたのに対し、技術者 B は新しい基準を追加することを考えていたため、部品であるフロントピラーを見る目が最初から異なっていたのである。

このように、問題の解き方やアプローチの仕方に応じて、技術者は臨時概念というべきものを定義していることから、標準的な概念を用意するのではなく、必要に応じて技術者が定義することができなければならないことがわかる。本稿では、UOA を用いて技術者が独自に臨時概念を定義し PD3 と関連づける手法を提案したが、これらの臨時概念を分析し、汎用性をもつ臨時概念を抽出、整理することで、さらなる技術者知識の体系化が可能となると期待できる。臨時概念の分析、体系化を進めるとともに、これらを PD3 と対応づけて汎用的な知識を抽出する手法を開発することは今後の課題である。

5. 考察

本稿で提案した 3 種類の対象への言及、すなわち、概念定義、状態定義、変化定義を用いることで、相異なる二人の技術者の対象への言及を全て記述することができた。このことから、3 種類の対象言及は十分な記述力を持っていることがわかる。本実験では、記述力を評価したのみで、これらの記述が第三者の理解をどの程度増進するかについては十分に評価することができなかった。第三者の理解度に関する評価は今後の課題である。

また、本実験では、対象への言及方式の抽出と、言及方式の評価について、同一の課題を用いている。このため、異なる課題について、3 種類の対象言及が十分であるかどうかは必ずしも明らかではない。他のエンジニアリング課題について、3 種類の対象言及で十分であるかどうかは今後の検討課題である。

本実験では、UOA を実験でリアルタイムで使用することができなかった。ユーザインターフェース等を改良し、実際の検討段階で直接 UOA と PD3 を用いて知識記述を進めながら問題解決を進めること、すなわち、本ツールをインプロセスで用いることで、技術者が考えたことを鮮度高く、正確に記録することができるようになると期待できる。なぜなら、事後的に思考過程を振り返ったときには、うまくいかなかったアイデア等について、技術者が語ることは少ないからである。インプロセスで PD3 と UOA を用いて思考過程を記録できるような統合ツールを作ることは今後の課題である。

本実験では、複数の技術者に共通する概念定義と、技術

者毎に異なる概念定義を見出すことができた。このことは、対象についての知識表現が、問題解決行為によってどのように異なりうるかを示している。技術者に共通する概念定義、技術者毎に異なる概念定義、および、問題解決の方針・アプローチの関係を分析することで、汎用的な対象知識をどのように問題解決行為と結びつけることが有効であるかについての示唆を得ることができると期待できる。このような知識分析は今後の課題である。

6. 結論

本研究では、問題解決時に設備や部品等、エンジニアリング対象に対して、技術者がそれらの状態をどのように認識し、どのような判断を行ったかをエンジニアリング対象の表現に直接記述し、これを PD3 と関係づけることで、技術者が考えたことを、第三者がより具体的に理解可能な形で記録できる手法を提案した。具体的には、対象に関する技術者の言及として(1)概念定義、(2)状態定義、(3)変化定義の 3 種類を提案し、これらを PD3 に対応づける方法、および、これらを CAD ファイル上で表現する UOA を設計し、これらを用いて自動車溶接工程における基準設計課題を例として本手法が、対象に関する技術者の言及を十分に表現可能であることを確認した。今後、本手法の有効性を他のエンジニアリング課題で確認することで、本手法の有効性や限界を評価するとともに、UOA と PD3 記述をインプロセスで記録可能なソフトウェアツールを開発する予定である。

謝 辞

本研究は東京大学社会連携講座「サステイナブルなヒューマンセントリック次世代ものづくり」の一環として実施した。

文 献

- (1) Monostori, L., Kadar, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., and Ueda, K., (2016) Cyber-physical system in manufacturing, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 65/2:621-641.
- (2) 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講演論文集, 日本機械学会, 19-03 (2019), 47
- (3) 後藤 潤平, 新森 聡志, 近藤 伸亮, 武田 英明, 梅田 靖: “Digital Triplet 型エンジニアリング支援のためのプロセスモデリング手法,” 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2022 講演論文集, 2022.