

3次元CGを活用した 保守作業技術学習コンテンツ編集支援ツール

藤原 貴之^{1,a)} 土屋 慎太郎¹ 薦田 憲久² 藤原 融²

受付日 2019年7月26日, 採録日 2020年1月16日

概要: 機器の保守作業のための 3DCG を用いた技術学習コンテンツを, 専用ソフトウェアの知識がなくても GUI 上で編集できる支援ツールを提案する. 本編集支援ツールでは, 3DCG オブジェクトを用いた操作指示文章自動生成, 3DCG オブジェクトの位置調整, 回転アニメーションの自動生成方式を導入し, 3DCG の高度な技術を持たないシステムエンジニアでも短期間でコンテンツ編集を可能としている. 本編集支援ツールを用いた 3 種類の保守対象機器向けにコンテンツ編集を通じて, 3 方式適用前と比較して 30%以上の編集工数の削減が可能であることを示した.

キーワード: メンテナンス, トレーニング, 3DCG, 編集支援ツール

Three-dimensional Computer Graphics-based Authoring Tool for Maintenance Learning Contents

TAKAYUKI FUJIWARA^{1,a)} SHINTARO TSUCHIYA¹ NORIHISA KOMODA² TORU FUJIWARA²

Received: July 26, 2019, Accepted: January 16, 2020

Abstract: The paper proposes an authoring tool for developing maintenance learning contents. The tool has three methods as automatically generating induction text with 3DCG, setting 3DCG position, and automatically generating 3DCG rotation animation. These three methods enable system engineers not having skill of tools for 3DCG to develop training contents at short term. As a result of development time with authoring tool for three target devices, the tool reduced over 30% authoring cost than an authoring tool without these three methods.

Keywords: maintenance, training, 3DCG, authoring tool

1. はじめに

機器の保守作業を行う現場において, 保守作業の事前技術学習を 3DCG (Computer Graphics) 化し, AR (Augmented Reality) や VR (Virtual Reality) を用いて組み立てや作業手順を説明するシステムがある [1], [2], [3], [4]. これらのシステムは多視点から対象機器の形状を確認し, インタラクティブに進めることで構造や作業手順を理解しやすいため, 保守作業技術学習の効率化に有効である.

しかし, 3DCG を用いたコンテンツは 3DCG のアニメーション作成, および指示文章と 3DCG を組み合わせたコンテンツ動作の制御に専門的な技量と手間が必要である. 保守対象規模が大きく期間も長い発電所, 建物点検などでは, 訓練効率化の効果を期待できるので 3DCG の専門家を投入して手間をかけてでも適用が可能である. しかし, フィットネスバイクや業務用洗濯機のように, 小規模で派生機種が多数ある場合, 個々の機種の製品寿命が短く保守にかけられるコストが少ないので, 開発コストが大きいと適用は困難である. これに対応するため, たとえば製品の CAD (Computer Aided Design) データをもとに機器分解手順をアニメーションで示すソフトウェアが公開されている [5]. しかし, これらは CAD データ設計ツールの一部と

¹ 株式会社日立システムズ
Hitachi Systems, Ltd., Shinagawa, Tokyo 141-8672, Japan

² 大阪大学
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{a)} takayuki.fujiwara.dh@hitachi-systems.com

して備わっており、CAD ソフトウェアの使用に専門的な技量を要する。また、3DCG 向け統合開発環境ソフトウェア [6] を用いる場合、ソフトウェアおよび 3DCG 制御機能の知識が必要となる。

この問題を解決するために、本論文では、3DCG オブジェクト選択による操作指示文章自動生成方式、3DCG オブジェクトの位置自動調整方式、および回転アニメーション自動生成方式を導入することにより、専用のソフトウェアの高度な技術を持たないシステムエンジニアでも、短期間に技術学習コンテンツを編集可能な環境を提案する。

以下、2 章では、保守作業技術学習システムとその上で動くコンテンツの概要を述べる。3 章では、保守作業技術学習コンテンツ編集支援ツール、および操作指示文章自動生成方式、位置自動調整方式、回転アニメーション自動生成方式について述べる。4 章では、編集支援ツールを適用した工数評価について述べる。

2. 保守作業技術学習システム

2.1 保守作業技術学習システムの概要

保守作業とは、対象機器の部品を交換または修理する作業である。従来の事前学習方法は、対象機器の前で講師から直接手順を教わる、作業手順書を事前に読む、講師の手順を撮影した動画を視聴するかのいずれかがある。しかし、受講者である保守作業担当者は、顧客先への移動が多く、1 人あたりの担当台数が多いため、対象機器の実機を備えた訓練施設に移動する時間確保が難しい。作業手順書を使用する場合、作業手順書にはすべての手順に画像が含まれておらず、文章だけの箇所が混ざり理解がしにくい。動画視聴の場合、機器の一部にフォーカスした映像をもとに解説するため全体の構造を把握しにくく、どの方向から工具を差し込み、どのようにパーツを外すかの理解に時間がかかる。

本論文で対象とする保守作業技術学習システム（以下、技術学習システムと記す）は、パソコンまたはタブレット端末に 360 度の任意の視点から対象機器の分解手順をアニメーション付きで機器分解・組み立て手順などを示す。受講者である保守担当者は保守作業の現場に行く前に事前実行することで、保守作業に必要な知識を習得できる [7]。

本論文では、システムの上で動く 3DCG オブジェクト、画像、文章やそれらを制御するプログラムを含んだものを保守作業技術学習コンテンツ（以下、技術学習コンテンツと記す）と定義する。機器を 3DCG で表現することで、多視点での構造確認が容易になる。また、テキストと画像で構成された手順書と動画で手順を解説された場合、動画では外し方の動きを確認できることから、より理解が進むという報告がある [8]。そこで、どの角度から工具を差し込み、ネジなどの取り付け部品を時計/反時計回りに回転させて取り外すか、パーツを取り外す方向や順番を 360 度の



図 1 技術学習コンテンツの画面構成

Fig. 1 The configuration of maintenance learning content.

任意の視点から確認できるアニメーションで示すことで学習効率の向上が期待できる。

本論文で使用する対象機器の 3DCG オブジェクトは、3 次元図形描画ソフトなどで作成するか、製品設計などで使用される CAD データがある場合、利用可能な形式に変換してから使用する。対象機器は実際の保守作業対象である機器外側のカバーや、内部の制御ユニットなどのパーツ単位で分かれている。ネジやドライブなど汎用的に使用可能な取付け部品の 3DCG オブジェクトはあらかじめ用意されており、複数の機器でも使用可能とする。そのため、対象機器以外の 3DCG オブジェクトの準備は原則不要である。特殊な取付け部品や工具を使用する場合、別途 3D モデリングなどで生成して使用する。なお、本論文で対象とする保守作業には、紙や pdf などの電子データでの手順書が存在し、3DCG を用いた技術学習システムはそれらの手順書を参考に開発される。

対象となる技術学習コンテンツは、いくつかの機器の訓練システムを開発する中で標準的なものとして決定した。図 1 に示す 3 つのエリアから構成される。図 1 の左側の〈1〉は、パーツ単位の作業項目を表示するエリアである。たとえば、フィットネスバイクの場合、シートポスト、ペダル、ベルトなどのパーツ交換に関する作業項目が表示される。パーツ名称をクリックすると代表的な作業項目が展開表示され、操作指示や 3DCG のアニメーションと対応した箇所がハイライト表示される。たとえば図 1 では「ペダルの交換」という文字列が選択され、「①右側ペダル取り外し」、「②左側ペダル取り外し」という作業項目が展開表示されている。図 1 上部の〈2〉は、実行中のユーザ操作を表示する。操作対象パーツ名や「ネジをクリックしてください」などの具体的な操作指示文章が表示される。図 1 の右下の大きいエリアの〈3〉は、3DCG で描画された対象機器を表示する。作業員はこのエリアをクリック、タッチして技術学習コンテンツを進める。

2.2 編集支援ツールに求められる機能と課題

3DCG を用いた技術学習コンテンツを開発する場合、まず既存の手順書を参考に仕様を作成する。次に仕様に基づき対象機器、取付け部品、工具の 3DCG オブジェクトを配置し、プログラミングなどで開発が進む。仕様作成後の工程には、3DCG やプログラミング技術を持つ技術者による多くの工数が必要であるという問題がある。

上記の問題を解決するため、3DCG オブジェクトのデータ構造に実際の動作に応じた文章テンプレート、3DCG オブジェクトの種別と座標情報を対応させるデータ構造を用意することで、3DCG オブジェクトを用いた文章自動生成、3DCG オブジェクトの自動位置調整、および回転アニメーション自動生成を備えた編集支援ツールを提案する。編集支援ツールに求められる要求は以下のとおりである。

(1) 文章入力削減による作業効率化とミス防止

技術学習コンテンツは、操作指示文章と、3DCG オブジェクトのアニメーションで構成される。編集支援ツールにおいては、キーボード入力により操作指示文章を作成できる。文章には「CG 内の右側ペダルをクリックしてください」、「CG 内のトルクスネジをクリックして、時計回りに回すことを確認してください」などがある。これらをキーボード入力するにはパーツ名称と動作内容をつど確認する必要がある。コンテンツ編集に慣れた熟練者でも、1つの文章あたり十数秒かかる。本論文で対象とする機器や手順は多様なことから、多数の文章入力を繰り返すと工数がかかる。そのため、文章入力を削減する仕組みが求められる。

文章入力を減らす方法として、たとえば既存の保守作業手順書の該当箇所の文字列を保存し、コンテンツ編集時に読み込んで自動表示させる方法が考えられる。しかし、従来の手順書では技術学習コンテンツ向けの指示文章がすべてカバーされていないことが多い。たとえば従来マニュアルに「項目 4 カバーからネジを外す」と「項目 5 カバーを取り外す」と書いてある場合、この 2つの文章を技術学習コンテンツに適用することは可能である。しかし、項目 4 と項目 5 の間に、「カバーを取り外す前に養生する」、「カバーは上に持ち上げてから手間に引いて外す」など、より細かい手順や注意が必要なことがある。これらは、既存の手順書には注意事項として記載される場合があるが、記載される場所や基準は機器によって異なるので、つど自動化するには大きな工数がかかり現実的ではない。

(2) 3DCG オブジェクトの表示位置調整の効率化

技術学習コンテンツでは、3DCG のアニメーションを用いて対象機器の分解工程を示す。そのため、工程ごとに 3DCG の取付け部品を必要な位置に配置してからアニメーションを生成する。アニメーション生成時には、PC 画面上に 3DCG オブジェクトを表示し、マウス操作により 3DCG オブジェクトの位置、角度を変更する。Unity [6] のような一般的な 3DCG コンテンツ開発ツールの操作では、

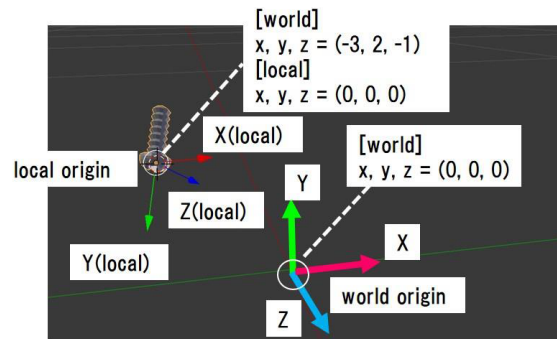


図 2 ワールド座標系とローカル座標系で示したネジ
Fig. 2 A screw by world and local coordinate system.

何も選択しない状態のマウスドラッグ操作で描画方向を変えつつ、マウス操作で 3DCG オブジェクトを所望の位置に移動させる。しかし、表示アングル変更にキーボード操作の併用が必要であり、左右のマウスドラッグ操作を駆使する必要がある。とくに 3DCG オブジェクトを回転させるためには、座標系に考慮して回転軸を設定する必要がある。正確な場所に移動させるには、3DCG 操作に慣れた熟練者であっても、1つの 3DCG オブジェクトを移動させるのに数十秒はかかる。分解工程が増えると必要な取付け部品をつど移動し調整する必要があるため、位置調整工数を短縮する仕組みが求められる。ここで、3DCG オブジェクトの回転を説明するため、3DCG の概要および座標系について説明する。

3DCG オブジェクトは通常、3DCG を描画する空間の原点を基準に点と面の集合で表現される。表現の最低単位は 3つの点を頂点とした三角形であり、多数の三角形を繰り返してつなぎ合わせることで三次元構造を表現する。3DCG オブジェクトのファイル形式は多数あるが、本論文で使用した .obj というファイル形式では、三角形の面ごとの頂点座標、各面の法線ベクトルの座標などが数値で記録されている。一般に、3DCG 空間の原点を基準とする座標系をワールド座標系またはグローバル座標系と呼ぶ（以下、ワールド座標系と記す）。また、ワールド座標系にある任意の座標を基準とする座標系をローカル座標系と呼ぶ。

図 2 に、3DCG オブジェクトのネジをワールド座標系とローカル座標系で示した例を示す。図 2 では、ワールド座標系の原点 (0, 0, 0) から X 方向に -3、Y 方向に +2、Z 方向に -1 移動した位置にネジが配置されている。ワールド座標系の立方体の座標は、ネジの重心で (-3, 2, -1) と設定されている。一方、ネジのローカル座標系はワールド座標系で定義されたネジの重心を原点として X、Y、Z 方向が定義される。ローカル座標系の X、Y、Z 軸は角度を含め任意に設定できるため、図 2 ではワールド座標系とは異なる軸に設定してある。3DCG オブジェクトを回転させる場合、ワールドまたはローカル座標系の軸回りに回転させることができる。たとえば図 2 で表示されているネジをネ

ジ山と垂直方向に回転させたい場合、ローカル座標系の Y 軸で回転させる必要がある。ワールド座標系の Y 軸で回転させると、ワールド座標の原点回りに回るだけで所望の回転にならない。3DCG オブジェクトを回転させるにはワールドとローカル座標系も考慮したうえで位置、角度を調整する必要がある。

3DCG 開発環境には、Unity の Inspector のように、3DCG オブジェクトの位置を GUI で変更する仕組みがある。

図 3 は、Unity の Inspector を使用し、3DCG オブジェクトの立方体の座標情報を表示させた例である。図 3 の Position はワールド座標系で示した位置座標、Rotation は回転角度、Scale は大きさを示している。図 3 上の画像は初期状態、図 3 下の画像は Inspector の Position を (0,0,0) から (0,2,0) に変更した例である。このように座標を直接入力することで、3DCG オブジェクトを決まった場所に移動させることができる。しかし、移動先の 3DCG オブジェクトの Position, Rotation, Scale の X, Y, Z の最大 9 個の値を控え、ワールドとローカル座標系を考慮しながら移動対象の 3DCG オブジェクトにつど入力するのは手間がかかる。

(3) 回転アニメーション生成の効率化

教育学分野で著名な Clark らによると、モータの構造理解、折り紙やネクタイの結び方など複雑な手順には、テキストと画像のみよりもアニメーションを含むコンテンツの方が理解度が高まると述べられている [9]。そこで、本論文で提案する編集支援ツールには、3DCG オブジェクトにアニメーションを付与する。技術学習コンテンツでは、どの角度から工具を差し込み、ネジなどの取り付け部品を時計/反時計回りに回転させて取り外すか、パーツを取り外す方向や順番などがアニメーションで表現される。

一般に、効率的にアニメーションを生成する代表的手段としてキーフレーム手法 [10] がある。キーフレーム手法とは、ある瞬間ごとの 3DCG オブジェクトの位置をキーとし

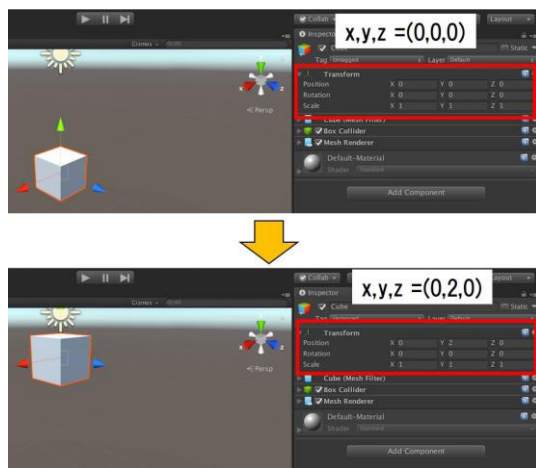


図 3 Unity の Inspector から立方体の座標を変更する例
Fig. 3 A position change example by Unity inspector.

て記録し、キーの間をコンピュータ処理で補完することで 3DCG を制御する手法である。キーフレーム手法を使用する場合、3DCG 化した工具や対象機器のパーツが必要な場所に移動させ、そのたびにキーを何度も登録することで必要なアニメーションを作成する。3DCG に慣れた熟練者であっても、1つの回転アニメーションを生成するのに 5 分程度かかる。本論文の対象コンテンツは直観的な理解を容易にするため、回転と同時に外れる/挿入する方向への移動が望まれる。Unity のような 3DCG 開発環境を使用すると、図 3 の Inspector に Position, Rotation の値をつど入力することで実現できる。しかし、回転軸や外す方向を考慮しながら、工具と取り付け部品の値をつど同時に入力するには 3DCG 開発環境の十分な知識が必要なほか、手間がかかる。そのため、回転アニメーション生成を短縮化する仕組みが必要となる。

3. 保守作業技術学習コンテンツ向け編集支援ツール

3.1 提案する編集支援ツールの概要

本提案のツールを用いて技術学習コンテンツを編集するときの流れを図 4 に示す。図 4 における作業項目とは、図 1 の〈1〉のエリアに記載される内容である。保守対象の部品名、および代表的な作業手順を入力する。図 4 における操作指示文章とは、図 1 の〈2〉のエリアに記載される操作指示であり、たとえば「CG のネジをクリックしてください」などの文章が入力される。図 4 におけるアニメーションとは、技術学習コンテンツに必要な動きを 3DCG オブジェクトに与えることである。

たとえばカバーに取り付けられたネジをドライバで外す場合、ドライバがネジに近づく、ドライバとネジが複数回転する、ドライバとネジがカバーから離れる、などの動作である。操作指示とアニメーションは必要な分だけ繰り返される。技術学習コンテンツに使用される 3DCG オブジェクトは、2.2 節 (2) で述べた座標系の情報以外に属性を持つ。

3DCG オブジェクトの属性を含む構造例を表 1 に示す。表 1 のように、3DCG オブジェクトは自分自身が工具、取り付け部品、対象機器のパーツのいずれかという属性を持っている。これらはあらかじめ 3DCG オブジェクト作成者

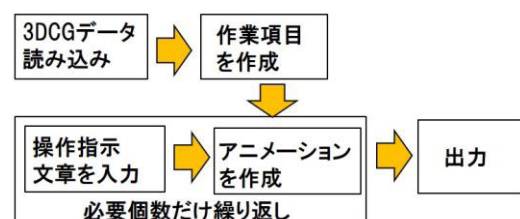


図 4 コンテンツ編集工程
Fig. 4 An authoring process.

表 1 オブジェクトのデータ構造例

Table 1 A data configuration example of 3DCG.

File name	Attribute	Position			Rotation			Scale			Move
ネジ	取り付け部品	0.5	0.9	0.3	10.4	5.5	8.2	10	10	10	あり (+/-)
		0	0.1	0	0	30	0	0	0	0	
ドライバ	工具	0.5	0.9	0.3	10.4	5.5	8.2	10	10	10	あり (+/-)
		0	0.1	0	0	30	0	0	0	0	
右カバー	パーツ	0	0	0	0	0	0	1	1	1	なし
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	
コンソールカバー	パーツ	0.45	0.5	1	0	0	0	1	1	1	なし
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	

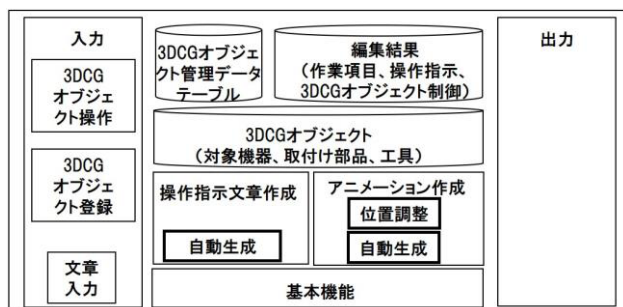


図 5 編集支援ツールのシステム構成

Fig. 5 The system configuration of authoring tool.

が登録する。なお、対象機器の各パーツは実際のパーツと同じ比率で 3DCG オブジェクト化するが、ネジなどの取付け部品は実際よりも 10 倍程度拡大し、デフォルメしている。これは、もともとサイズが小さい部品をパーツと同じ比率で表示すると見にくくなり、技術学習に支障が出るためである。表 1 の Position, Rotation, Scale は上段がワールド座標系、下段がローカル座標系であり、3DCG オブジェクト作成時に調整された値である。任意の位置に指定できるため、工具が取付け部品に近づき、回転アニメーションが実行されるときに位置とする。Move では、回転軸回りの回転有無が設定される。「あり」で「+」の場合、回転軸に対して上方向に回転し、「あり」で「-」の場合、回転軸方向に対して下方向に回転することを示している。

次に、編集支援ツールのシステム構成を図 5 に示す。入力に含まれる 3DCG オブジェクト操作、3DCG オブジェクト登録、文章入力はマウスやキーボードで実施される。基本機能とは、3DCG オブジェクトや指示文章の入力結果を表示、3DCG オブジェクトのファイルの読み込みや保存などを行う機能である。編集支援ツールには、機器によらず共通で使用する 3DCG オブジェクトがあらかじめ登録されている。そのため、対象機器の 3DCG オブジェクトを登録することで、コンテンツ編集が可能である。しかし、機器によっては、あらかじめ登録された 3DCG オブジェクトではコンテンツ編集ができないことがある。このような場合、共通で使用する部品の 3DCG オブジェクトを新たに追加で登録できる。登録された 3DCG オブジェクトは、図 5 の 3DCG オブジェクト管理データテーブルで管理され、別の機器向けのコンテンツ編集にも活用できる。

表 2 取付け部品動作定義テーブル例

Table 2 An operation definition table example for attachment parts.

名称	緩める	外す	時計/反時計回り
プラスネジ	○	○	×
マイナスネジ	○	○	×
トルクスネジ	○	○	×
ナット	○	○	○

表 3 取付け部品動作文章定義テーブルの例

Table 3 A text template table example for attachment parts.

動作	文章テンプレート
緩める	クリックして緩むことを確認してください
外す	クリックして外れることを確認してください
時計/半時計回りに回す	クリックして時計回りに回すことを確認してください クリックして反時計回りに回すことを確認してください

各 3DCG オブジェクトのファイルパス、表 1 に示すデータ構造は 3DCG オブジェクト管理データテーブルで管理されている。コンテンツ編集を行うと、編集時に入力された作業指示文章テキスト、3DCG オブジェクトの配置やアニメーションデータの出現順番を記した編集結果が出力される。これらは編集支援ツール内に保存され、再編集が可能である。図 5 に記載したアニメーション位置調整、アニメーション自動生成、および操作指示文章半自動作成の詳細については次の節より順番に述べる。

3.2 3DCG オブジェクト選択による操作指示文章の自動生成方式

編集支援ツールは、取付け部品の動作を管理するための、取付け部品動作定義テーブル、取付け部品動作文章定義テーブルを持つ。取付け部品動作定義テーブルは、表 2 のように表され、取付け部品に起こりうる動作を分類している。○は該当する動作を含み、×は該当する動作を含まないことを示す。表 2 第 4 列目の「時計/反時計回り」の列は、外す際の回転方向を示している。回転方向は原則反時計回りであるが、自転車のペダルのように回転するものに取り付けられている場合は、取り外しの回転方向が時計回りになることがある。

次に、取付け部品動作文章定義テーブルの例を表 3 に示す。表 3 には取付け部品を使った代表的な操作と、それを説明するための文章テンプレートが記載してある。たとえば、「緩める」という動作の場合、「クリックして緩むことを確認してください」という文章が該当する。「外す」や「時計/反時計回りに回す」のように複数の文章がありうる場合、編集支援ツールでは複数の文章を候補として表示する。

本方式で指示文章を自動生成する仕組みを図 6 に示す。
(i) 表示部：技術学習コンテンツを PC のディスプレイに表示する。

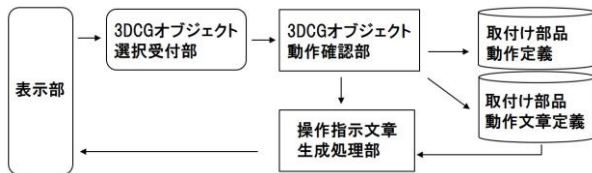


図 6 指示文章の自動生成方式ソフトウェア構成

Fig. 6 Software configuration for automated text generation method.

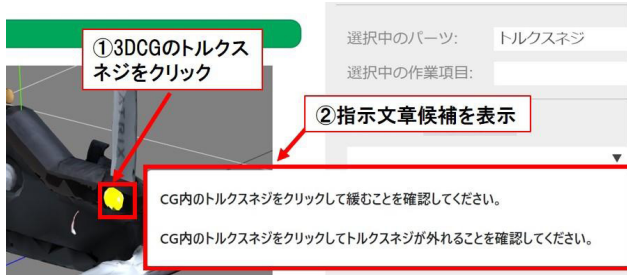


図 7 トルクスネジ選択による操作指示文章候補表示例

Fig. 7 An example of candidate texts by selecting torx screws.

(ii) 3DCG オブジェクト選択受付部：対象の 3DCG オブジェクトが選択されたことを受け付ける処理部であり，マウス操作でダブルクリックされると，クリック位置から 2D 画面の法線方向と衝突した 3DCG オブジェクトの情報を取得する。

(iii) 3DCG オブジェクト動作確認部：(ii) で取得した 3DCG オブジェクトの属性を確認する。

(iv) 文章テンプレート：表 3 に示した，動作と対応する操作指示文章の一覧である。

(v) 操作指示文章生成処理部：(iii) で確認した動作と (iv) のテンプレートから，文章候補を表示部に表示する。

図 7 は，フィットネスバイクのカバー交換を実施すべく，トルクスネジを取り外す指示文章の作成画面例である。フィットネスバイクの描画領域で，該当するトルクスネジをマウスで選択する。なお，このコンテンツ編集支援ツールでは選択された 3DCG オブジェクトは黄色でハイライトされる。表 2 の取付け部品動作定義テーブルの第 3 行目のとおり，トルクスネジは「緩める」と「外す」の動作を持つ。そのため，表 3 の取付け部品動作文章定義テーブルの第 1 行目，第 2 行目より，「CG 内のトルクスネジをクリックして緩むことを確認してください」，「CG 内のトルクスネジをクリックしてトルクスネジが外れることを確認してください」という文章候補が操作指示文章生成処理部によって生成され，表示部に表示される。編集支援ツール使用者が候補の中から適切な文章を選択すると，選択された文章が図 1<2> の操作指示エリアに表示される。自動生成により，作成時間の短縮だけでなく，「ください」，「下さい」などの表記ゆれ統一も可能になり，見直し工数低減が期待できる。

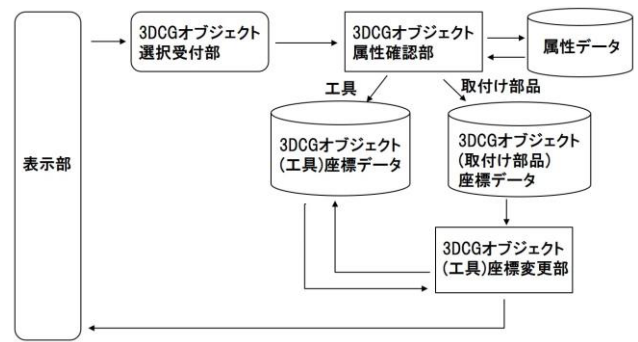


図 8 3DCG 位置調整方式ソフトウェア構成

Fig. 8 Software configuration for position alignment method.

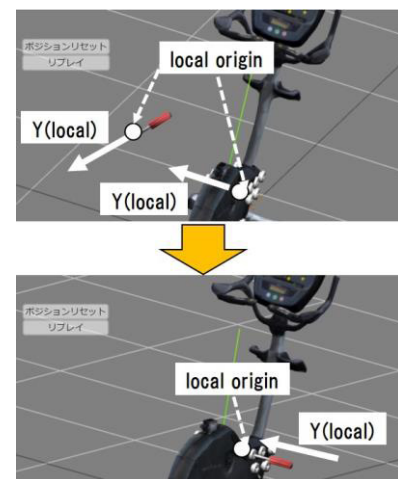


図 9 3DCG オブジェクトの自動調整実行例

Fig. 9 An example of automatically aligned 3DCG objects.

3.3 3DCG オブジェクト選択によるアニメーション作成 対象位置の自動調整方式

本方式で 3DCG オブジェクトを移動させる仕組みを図 8 に示す。なお，表示部，3DCG オブジェクト選択受付部は図 6 と同一のため説明を省略する。

(i) 3DCG オブジェクト属性確認部：表示部で取得した 3DCG オブジェクトの属性を確認する。

(ii) 属性データ：表 1 に記載の「取付け部品」，「工具」，「パーツ」があり，3DCG オブジェクトが持つ属性を管理する。

(iii) 3DCG オブジェクト座標データ：取得した 3DCG オブジェクトの情報を登録する。

(iv) 3DCG オブジェクト座標変更部：(iii) に登録された取付け部品の座標を取得し，工具の座標の Position を取付け部品の Position 座標で上書きする。3DCG オブジェクトが重なりすぎる場合，ツール利用者が直接修正可能である。

提案方式を用いた 3DCG オブジェクトの移動例として，フィットネスバイクの右側カバー交換におけるネジ取り外しのアニメーション作成画面を図 9 に示す。図 9 ではドライバとネジの回転方向がローカル座標系の Y 軸である。ドライバでネジを外すアニメーションを作るには，ドライ

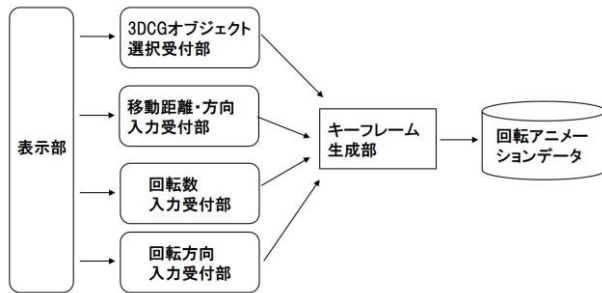


図 10 回転アニメーション自動生成方式ソフトウェア構成

Fig. 10 Software configuration for automated rotation animation method.

バ先端をネジ山に移動させる必要がある。提案方式では、ドライバ、ネジの順番に 3DCG オブジェクトが選択されると、ドライバの世界、ローカル座標系の Position, Rotation をネジの値で上書きする。この結果、ネジとドライバの回転軸が一致した状態で、ドライバがネジ山に瞬時に移動する。従来はマウス操作でドライバの位置微調整に工数がかかっていたが、瞬時に完了できる。

3.4 回転アニメーションの自動生成方式

3DCG オブジェクトのローカル座標系の Y 軸を回転軸として、指定した角度の分だけオブジェクトを回転させ、同時に回転軸方向に直線移動するキーフレームを自動生成する仕組みを提案する。3DCG オブジェクトは表 1 と同じ情報を持っている。

回転の計算にはクォータニオン（四元数）[11] を使用する。方向ベクトル $\vec{n}$ を軸とした角度 θ の回転を示すクォータニオン q は、以下の数式で示される [12]。

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + \vec{n} \sin \frac{\theta}{2}$$

ワールド座標系で示される 3DCG オブジェクトのベクトル $\vec{r}$ を、方向ベクトル $\vec{n}$ 周りに角度 θ 回転したときのベクトル $\vec{r'}$ は、以下の数式で示される。

$$\vec{r'} = q\vec{r}\bar{q}$$

ここで、 $\bar{q}$ は q における共役なクォータニオンである。3DCG オブジェクトが方向ベクトルに沿って移動するとき、スカラー m を用いることで、回転および直線移動をするときの 3DCG オブジェクトのベクトル $\vec{R}$ は、以下の数式で示される。

$$\vec{R} = \vec{r} + m\vec{n}$$

キーフレームの登録対象は、回転および回転軸への移動後のベクトル $\vec{R}$ である。

本方式により回転アニメーションを自動生成する仕組みを図 10 に示す。なお、表示部、3DCG オブジェクト選択受付部は図 6 と同一のため説明を省略する。

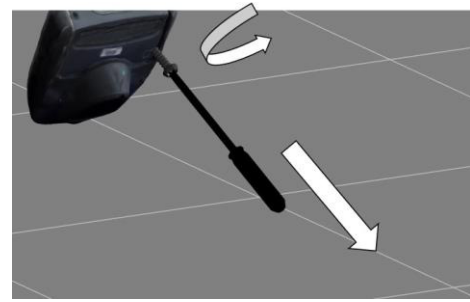


図 11 回転アニメーション自動生成実行例

Fig. 11 An example of automatically rotate-animation.

- (i) 移動距離・方向入力受付部：回転時、回転軸方向への直線移動する距離を受け付ける。
- (ii) 回転数入力受付部：1 回転を 360 度とし、ユーザ操作のキーボード入力を受け付ける。
- (iii) 回転方向入力受付部：時計、反時計回りのいずれかを受け付ける。
- (iv) キーフレーム生成部：指定回数に沿ってキーフレームを生成する。
- (v) 回転アニメーションデータ：生成されたキーフレームを保存する。

回転対象となる 3DCG オブジェクトは 3.3 節と同一であり、回転軸がローカル座標系の Y 軸である。そのため、3DCG オブジェクトの回転角度、回転軸方向への座標を変更、キーフレーム登録という作業が不要になり、回転アニメーションをほぼ瞬時に作成できる。

この方式を用いて軸移動も含めた回転アニメーションの生成イメージを図 11 に示す。ここではフィットネスバイクのコンソールパネル背面のネジをドライバで外すアニメーションを示している。説明のためネジとドライバの scale を大きくしている。作成した回転アニメーションにより、ネジとドライバは反時計回りに回転しながら、ネジが外れる方向（回転軸方向）へ同時に移動する。

3.5 作業別の工数削減効果

3.2 から 3.4 節で提案した方式の工数削減効果を検証するため、それぞれの作業ごとの時間を測定した。評価実施者は保守作業の実施経験はなく、プログラムを書いたことはほとんどないが、3DCG の知識は持っていて 3DCG の簡単なモデリングが可能である（非開発者と表記する）。また、本編集支援ツールを扱う前にひととおりの使い方を事前学習している。検証条件は次のとおりである。

(1) 操作指示文章の入力作業

「CG 内のネジを選んでください」のように 1 つの部品を選択する指示文章と、「CG 内のネジをクリックしてネジが外れることを確認してください」のように 1 つの部品を選択して、その後のアニメーションを確認する指示文章を 5 つずつ準備した。従来方式では準備した文章を手入力した

表 4 作業項目別の所要時間比較 (相対値)

Table 4 Necessary times of each works (relative).

作業項目	従来方式	提案方式	削減率(%)
(1)	1	0.360	64.0
(2)	1	0.167	83.3
(3)	1	0.558	44.2

ときの時間を計測した。提案方式では対応する 3DCG オブジェクトをクリックし、表示された候補文章から適切なものを選択し終わるまでの時間を計測した。

(2) 3DCG オブジェクトの表示位置調整作業

使用頻度の高いプラスネジとドライバを対象として、両者の Position, Rotation を様々に変化させた場合を 10 パターン準備した。従来方式は、3DCG オブジェクトのドライバを選択し、ドライバの長軸をネジの長軸に合わせ、ドライバ先端をネジ山に合わせるまでの時間を計測した。提案方式では、3DCG オブジェクトのドライバ、ネジの順番に選択し、提案機能を実行してドライバがネジ山に移動するまでの時間を計測した。

(3) 回転アニメーションの作成作業

(2) の 10 パターンを対象とし、回転アニメーションを作成するまでの時間を測定した。従来方式では、ドライバとネジを 100 度回転させ、Y 軸方向に 0.2 移動させてキーフレームを登録するまでの時間を計測した。提案方式では、ドライバとネジを順番に選択し、提案機能を実行してアニメーションが生成されるまでの時間を計測した。

各方式を 10 回実施したときの所要時間の和を、従来方式の合計実施時間を 1 として正規化した結果を表 4 に示す。

表 4 (1) について、文章が短い場合は従来方式と提案方式の工数の差が小さかった。この理由として「ネジをクリックしてください」のような短い文章の場合、対象の 3DCG 部品をマウスドラッグで探して選択するより、キーボードで直接入力の方が早いと考えられる。(2) の工数削減率は最も高かった。これは、2.2 節 (2) で述べたとおり、マウス操作を多数繰り返して 3DCG オブジェクトを調整する手間が大きいことを意味している。(3) については、従来方式でもキーフレームに登録するためのマウス操作が回転と直線の 2 回である。そのため、(2) のような大きな削減率にはならなかったと考えられる。

4. 評価

開発した編集支援ツールを用いて、3 つの業務用機器に対して技術学習コンテンツを編集し、それぞれの工数削減効果を評価した。評価者は、3.5 節の実施者に加え、筆者の 2 名である。筆者は保守作業経験がないが、編集支援ツールのプログラム開発を担当しており、ツールの操作方法は十分に理解している。また、3DCG の知識は持っていて、3DCG の簡単なモデリングが可能である。対象の 3 つの機

表 5 評価対象機器とコンテンツの概要

Table 5 Overview of target devices and contents.

機器	W, D, H 概算(cm)	コン テン ツ数	画面 数	パー ツ数	工具 数	取付け 部品数
A	70, 120, 140	8	63	19	3	38
B	60, 70, 110	8	151	36	4	48
C	80, 110, 180	6	62	18	1	13

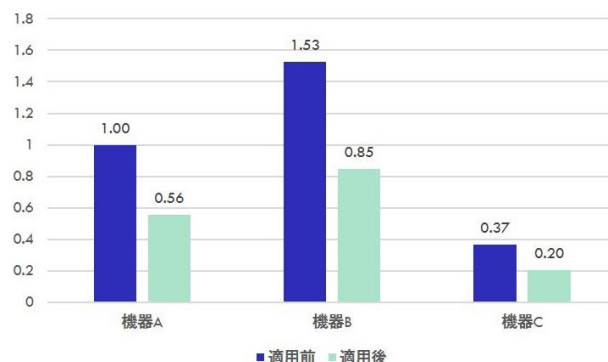


図 12 編集工数の比較 (非開発者)

Fig. 12 Evaluation of proposed methods by a non-developer.

器の製品規模、コンテンツ規模、3DCG パーツ、取付け部品の数を表 5 に示す。

3 つの機器はいずれも室内で使用される。編集したコンテンツは、対象機器の交換作業パーツの交換手順を 1 つの単位とした。パーツとは、実際の保守作業対象である機器外側のカバーや、内部の制御ユニットなどである。画面とは、コンテンツを実行したときに表示される操作指示の個数で定義した。工具の数とは、訓練に使用した工具の数である。たとえば、ドライバ、レンチなどが該当する。取付け部品の数とは、対象機器のパーツ間を結合するために必要な取付け部品である。たとえば、ネジ、トルクスネジ、六角ボルトなどが該当する。

工数削減効果を評価するため、本論文で提案した 3 つの方式適用前と適用後による工数を比較した。3 つの方式適用前の工数は、3.5 節の個別機能の作成工数や、3 方式開発前のコンテンツ編集工数を参考にして算出した。

非開発者について、3 つの方式適用前の機器 A 向けコンテンツ編集工数を 1.00 として、その他の工数を比率で示した結果を図 12 に示す。機器 A, B については、それぞれ方式適用前と比較し半分かそれ以下になった。一方、機器 C については削減効果が 30%にとどまった。これは、表 5 のとおり、機器 C の取付け部品が機器 A, B と比較して少なく、取付け部品の 3DCG オブジェクトの調整や回転アニメーション作成が少なかったためと考えられる。

次に、筆者について、3 つの方式適用前の非開発者による機器 A 向けコンテンツ編集工数を 1.00 として、その他の工数を比率で示した結果を図 13 に示す。図 12, 図 13 のとおり、コンテンツ編集工数自体は筆者の方が少なく、非開発者の半分程度の工数で編集できている。これは編集

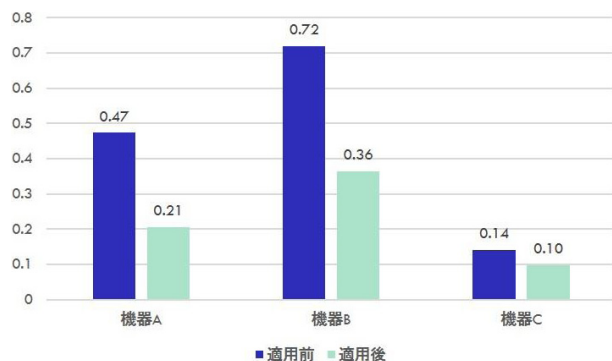


図 13 編集工数の比較 (筆者)

Fig. 13 Evaluation of proposed methods by a developer.

支援ツールの開発に携わっていることから、操作方法に慣れており、効率向上の上限値と考えられる。一方、3つの方式の適用前後による機器A, B, C向けのコンテンツ編集工数の比率は、いずれも非開発者と同様の傾向であった。これは、編集支援ツールの習熟にかかわらず、3つの方式の適用による効果が出ていることを示唆している。

今回の評価は、フィットネスバイクをはじめとして、いずれも室内で扱う機器を対象とした。本編集支援ツールは3DCG化できるパーツ数が同程度他機器でも適用可能である。また、家庭用の機の組み立てなどにも応用ができる。

5. おわりに

本論文では、3DCGを用いた保守作業技術学習コンテンツ編集における編集工数低減を目的として、3DCGオブジェクトを用いた操作指示文章自動生成、3DCGオブジェクトの位置調整、回転アニメーションの自動生成方式を導入した編集支援ツールを開発した。編集支援ツールを用いて3機種22個のコンテンツを編集し、3方式適用前後の編集工数を比較したところ、3方式適用前と比較して30%以上編集工数削減ができることが分かった。また、アニメーションの量が大きな機器向けのコンテンツほど本方式の適用効果が高い。

参考文献

- [1] Webel, S., Bockholt, U. and Keil, J.: Design Criteria for AR-Based Training of Maintenance and Assembly Tasks, *Proc. International Conference on Virtual and Mixed Reality*, pp.123–132 (2011).
- [2] Crescenzo, D.F., Fantini, M., Persiani, F., Stefano, D.L. and Azzari, P.: Augmented Reality for Aircraft Maintenance Training and Operations Support, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.31, No.1, pp.96–101 (2011).
- [3] Fiorentino, M., Uva, E.A., Gattullo, M., Debernardis, S. and Monno, G.: Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions, *Computers in Industry*, Vol.65, No.2, pp.270–278 (2014).
- [4] Sportillo, D., Avveduto, G., Tecchia, F. and Carrozzino, M.: Training in VR: A Preliminary Study on Learning Assembly/Disassembly Sequences, *Proc. International*

Conference of Augmented and Virtual Reality, pp.332–343 (2015).

- [5] PTC: 3D CAD Software Creo (online), available from <https://www.ptc.com/en/product/cad> (accessed 2019-06-03).
- [6] Unity Technologies: Unity (online), available from <https://unity.com/ja> (accessed 2019-06-03).
- [7] Fujiwara, T., Tsuchiya, S., Komoda, N. and Fujiwara T.: A Fitness Bike Maintenance Training System with Three-Dimensional Computer Graphics, *Proc. 12th International Conference on ICT, Society and Human Beings*, pp.39–46 (2019).
- [8] 蘇我泰明, 竹林辰弥, 大野邦夫: 動画による取説・マニュアルの検討, 画像電子学会研究報告, Vol.9, No.6, pp.103–110 (2012).
- [9] Clark, R.C. and Mayer, R.E.: *E-Learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning*, Jossey-Bass/Pfeiffer (2003).
- [10] Beane, A.: *3D Animation Essentials*, Sybex (2012).
- [11] Kuipers, J.B.: *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality*, Princeton University Press (1999).
- [12] 矢田部学: クォータニオン計算便利ノート, MSS 技報, Vol.18, pp.29–34 (2007).



藤原 貴之 (正会員)

2008年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。研究開発センタ所属。2017年(株)日立システムズ出向。3DCGを用いた保守作業技術学習システムの研究開発に従事。2018年4月大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア専攻博士後期課程に入学。

土屋 慎太郎

2013年横浜国立大学知能物理工学科卒業。同年(株)日立システムズ入社。IT資産管理システムのパッケージ製品開発業務を経て、3DCGを用いた保守作業技術学習システムの研究開発に従事。



薦田 憲久

1974 年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。1991 年大阪大学工学部助教授, 1992 年同大学教授。2015 年同大学名誉教授, コーデソリューション(株)顧問。2016 年大阪大学大

学院情報科学研究科招へい教授。工学博士。技術士(情報工学)。IEEE, 電気学会の終身会員。



藤原 融 (正会員)

1981 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1986 年同大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。同年同大学助手。1997 年より同大学教授。現在, 同大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻所属。符号

理論, 情報セキュリティの研究に従事。日本学術会議連携会員。電子情報通信学会等の会員。