

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870628

研究課題名(和文) 初期設計段階から性能と環境負荷削減を両立するライフサイクル多目的設計支援システム

研究課題名(英文) A multi-objective life-cycle design support system for Improving Performance and CO2 Savings at the early phase of design

研究代表者

井上 全人 (Inoue, Masato)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：60365468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：様々な不確実性を含む初期設計段階で、3D-CADを操作しながら製品のライフサイクルオプションをあらかじめ計画し、製品の環境負荷影響を評価しながら設計検討することで、資源の循環性や再利用性を高めることが期待できる。本研究では、3D-CADモデルの寸法情報を設計変数とし、不確実な設計情報を範囲を有する集合で表現することで、性能と環境負荷削減を両立する多目的満足解集合を導出するライフサイクル設計支援システムを提案した。さらに、設計者の負担となる試行錯誤的な設計変更を支援するために、設計者に代行して評価を行うシステムを提案した。その結果、性能要求と環境要求を同時に満足する多目的満足解集合が導出された。

研究成果の概要(英文)：Preplanning the life cycle options for each part of a product and evaluating the environmental loads of the product at the early phase of design by applying 3D-CAD lead to resource recycling and significant reductions in the environmental loads for the whole product life cycle. The early phase of design contains multiple sources of uncertainties. This paper proposes a life cycle design support system based on 3D-CAD, which enables a satisficing design for both the product performances and the reduction of the environmental loads. The proposed system supports to define the life cycle options and to obtain multi-satisfactory design solution sets by applying a preference set-based design method, which enables a flexible and robust design under various sources of uncertainties. The present study applies the proposed system to a multi-objective problem for technical and environmental performance requirements as an example problem, that is, a cleaner model created by 3D-CAD.

研究分野：ライフサイクルエンジニアリング

キーワード：ライフサイクル設計 多目的設計支援 環境負荷削減 初期設計段階 セットベース設計

1. 研究開始当初の背景

モノづくりにおいて、初期設計段階は製品の品質やコストの大半を決定する最も重要なプロセスであるが、不確実な情報が多いために設計者は自らの経験や勘を元に、あいまいな状態で設計値を決定する。設計とは試行錯誤と失敗の繰り返しであるが、その失敗や設計の後戻りの負担は大きく、設計者のかかえる問題は大きくなるばかりである。

現在、3D-CAD や CAE (構造解析ソフトウェア) 等の設計支援システムは、開発現場に浸透しているが、明確な値を基に計算を行うため、あいまいな設計情報が含まれる場合には必ずしも適応していないことがある。さらに、地球環境問題に対する企業責任が論じられ、設計者の負担はますます増えている。近年、3D-CAD ベースの環境配慮設計システムが開発され (例えば、Dassault Systèmes 社の SolidWorks Sustainability)、製品ライフサイクルの環境影響を評価することが可能となったが、CO₂ 削減目標等の環境要求を満足するライフサイクルオプションの提示や、製品の性能や品質等を含む多目的要求を満足する設計案の導出支援は行われていない。

また、従来の多目的最適化手法では、設計者の経験、勘やノウハウによるポイント値で規定された設計案を創出し、その案が全ての多目的要求を満足するまで修正を繰り返すことが行われており、本来共有されるべきプロセスやノウハウも設計者個人に依存しているため、設計の後戻りを発生させ、生産性低下を引き起こしている。

したがって、3D-CAD を用いた不確実な情報が含まれる設計初期段階においてもロバストな多目的設計解集合を導出し、製品の環境負荷を含む多目的評価を自動連携で行い、多目的満足案を設計者に提示することができれば、3D-CAD を操作しながら設計精度や生産性の向上、データの一元化による他部門との協調設計、CAE 等の各種解析ソフトウェアを用いた評価による多目的設計が可能となり、開発作業の効率化につながり、設計の後戻りを防ぐことができる。

初期設計段階は、さまざまな不確実性を含むため、設計者は経験や勘により、ポイント値として設計案を導出し、その設計案が多種多様な要求仕様や制約条件を満足するまで修正を繰り返すことが多い。しかしながら、少しの設計修正が広い範囲に影響を引き起こす可能性があるため、設計の不確実性を考慮しながら多目的満足化設計を行うことが求められている。

2. 研究の目的

上記の研究背景に鑑み、3D-CAD モデルや環境負荷評価システム、構造解析ソフトウェア等の評価を行う複数のシステムを

それぞれエージェント化することで、設計者が 3D-CAD モデルを修正すると、複数の評価システムが自律的にその修正をセンシングして、設計者に代行して多目的評価を行う設計支援システムを開発する。これにより、製品の性能だけでなく、製造・輸送・廃棄・リサイクルまでのライフサイクル全体の環境負荷評価を含む設計支援システムを構築できる。

一方、申請者らは、初期設計段階の不確実な要求性能や設計変数に関する諸量の範囲に対して、範囲内でどの部分をより重要視するかという設計者の意図を表す選好度付きの範囲集合として取り扱うことで、設計者の設計意図を反映した多目的設計解集合の導出が可能な Preference Set-Based Design 手法 (以下、PSD 手法と呼ぶ) を提案している。本研究では、セットベース設計手法を多目的設計のソルバーとして導入することで、初期設計段階の不確実性を考慮しながら製品の信頼性も環境問題も同時に満足する多目的設計を可能とする製品のライフサイクル設計システムを開発する。

3. 研究の方法

3.1 3D-CAD モデルのエージェント化

本研究では、自律性、協調性、柔軟性を持つエージェント技術を用い、3D-CAD モデル情報と非形状情報 (部品名、材質、リサイクル材料利用率、ライフサイクルオプション、部品寿命) を含む設計情報をエージェント化する。これにより、システムによる評価結果を受けて設計者が設計変更した場合、その変更柔軟に対応して評価を行うことが可能となる。一般に、設計者が設計変更を行う場合、他の性能に関する多目的評価結果とのトレードオフ関係の問題等で設計変更を何度も繰り返すことが多い。このような設計者の負担となる試行錯誤的な設計変更を行う場合に、エージェント技術が設計者に代行して評価を行うと同時に、要求仕様を満足する設計案を導出することも可能となる。

3.2 システムの概要

3D-CAD を用いる設計初期段階において、環境要求を含む多目的な要求仕様を満足する設計案を提示することを目標として、以下の 4 点に注目したライフサイクル設計支援システムの構築を行った。

3D-CAD が有する設計情報を性能や環境負荷の評価に直接利用する。

設計変更に伴う環境負荷評価をシステムが自律的に代行する。

環境要求を満足する各部品のライフサイクルオプション、材質を提示する。

不確実な設計情報を選好度付きの集合として表現することで、多目的要求を満足する設計解集合を導出する。

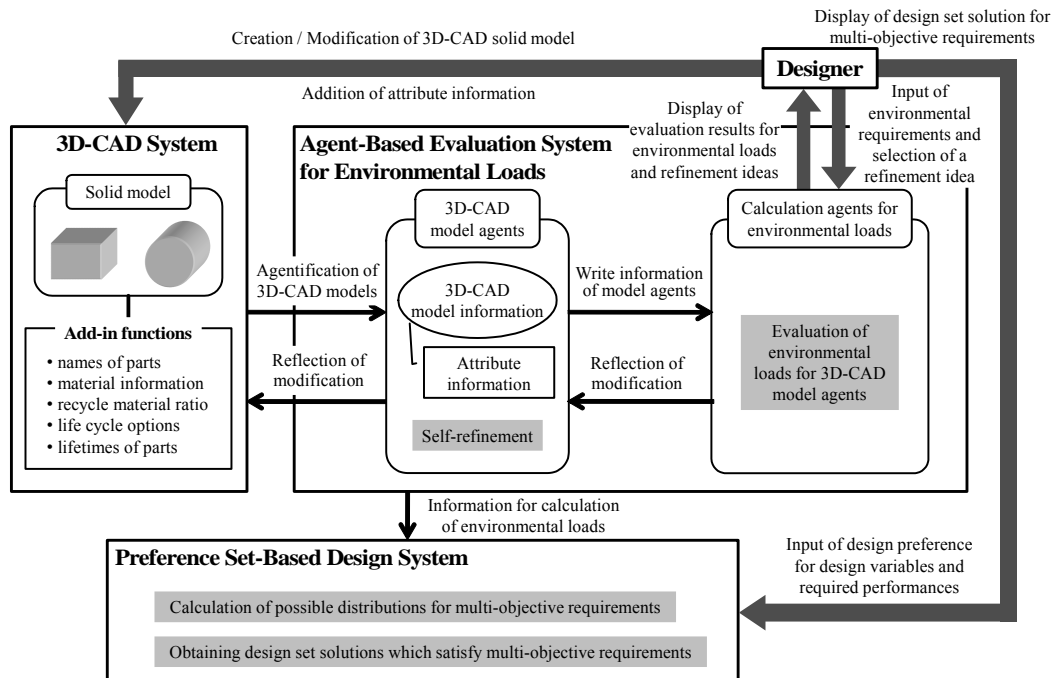


Fig. 1 Overview of life cycle design system based on 3D-CAD and preference set-based design

システムの概要図を図1に示す。本研究で構築したシステムは、大きく分けて設計作業を行う3D-CADシステム、製品の環境負荷評価を代行し、環境要求を満足するライフサイクルオプションを提示するエージェントを含む環境負荷評価システム、多目的な要求性能を満足する設計解集合を導出するセットベース設計システムの3つから構成される。3つのシステムは、評価対象モデルの設計情報が記載されたMicrosoft Excel ファイルを相互に読み書きすることで連携する。3D-CADシステムには、SolidWorksを用い、環境負荷評価システムはMicrosoft社のVisual C++ 2008 Express Editionにて作成した。

まず、3D-CADを用いた3D-CADモデル（構成部品モデル）の作成時において、環境負荷評価を行う上で必要なライフサイクルオプションや部品の寿命等の非形状情報を属性情報として、3D-CADモデルへ付加する。各3D-CADモデルの形状情報と付加した非形状情報は、アセンブリモデル（組み立てモデル）作成時にMicrosoft Excelファイルにモデルエージェントとして出力される。出力された属性情報には、3D-CADモデルごとの質量、体積、材質、リサイクル材料使用率、廃棄方法、寿命について記載されており、これらの情報を元に環境負荷評価を実行する。

環境負荷量算出後、設計者はエージェントの提示する設計案を参考にしながら、環境負荷量削減に向けて材質やライフサイクルオプションを含む設計変更を行う。一方、環境負荷量（CO₂, SO_x, NO_x）の上限

値を入力することで、環境要求を満足する材質やライフサイクルオプションを提示することも可能である。

製品の材質およびライフサイクルオプションを決定した後、環境負荷評価システムからセットベース設計システムに環境負荷評価に関わる情報（3D-CADモデルの寸法を設計変数とした場合、設計変数と質量の関係式、環境負荷原単位データ、材質、ライフサイクルオプション）が読み込まれる。セットベース設計システムに、設計変数と要求仕様（性能要求と環境要求）の嗜好度付き集合を設定し、多目的要求を満足する設計解集合を導出する。

3.3 3D-CADモデルへの属性情報付加

アドインプログラムにより、図2に示すように3D-CADモデルへ属性情報を付加する。さまざまな属性情報を付加することにより、設計者の意図を非形状情報として3D-CADモデルに持たせられる。

本研究では、廃棄方法として廃棄（埋立、焼却）、リサイクル（マテリアル、サーマル、ケミカル）、リユース（スペアパーツ、リマニュファクチャリング、グローバルリユース）からなる8種類のライフサイクルオプションから選択できる。部品の寿命が製品の寿命より長く、部品が複数回使用される場合には、複数のライフサイクルオプションの組み合わせを選択することができる。

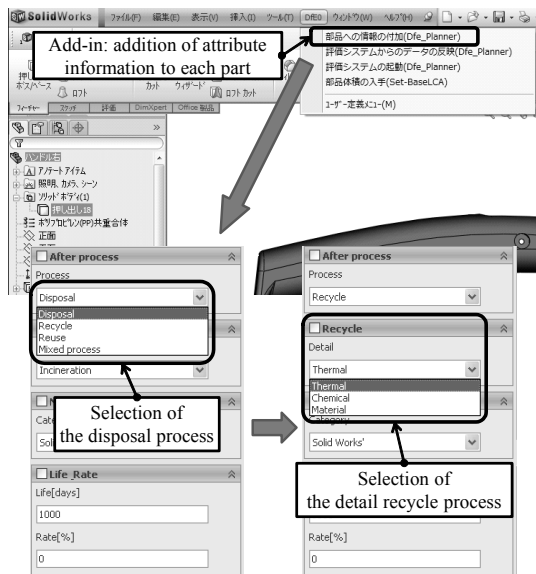


Fig. 2 Addition of the attribute information

3. 4 ライフサイクルアセスメント (LCA) による環境負荷評価

本研究では、初期設計段階から製品のライフサイクルを通じた環境負荷評価を行うにあたり、リユース、リサイクル、廃棄のライフサイクルオプションを設定する。

日本真空工業会 (JVIA) では、真空関連機器の評価を想定した JVIA LCA モデルを作成し、製品装置のライフサイクル全体にわたる各有害物質の排出量 [kg] を環境負荷量の出力として用いている。このモデルでは、製作、使用、保全、廃棄 (焼却) プロセスから得た環境負荷量の総和とリユース、リサイクルプロセスでの環境負荷低減

量の差により、全ライフサイクルにおける環境負荷を算出するという単純なモデルであるため、JVIA LCA モデルの考え方は、真空関連機器以外にも適用可能である。本研究では、製品使用後のリサイクル、リユースを含む廃棄プロセスに注目し、JVIA LCA モデルに基づいて CO₂ [kg], NO_x [kg], SO_x [kg] の環境負荷量を算出する。各環境負荷原単位および環境負荷低減原単位は、研究機関の情報に基づいた値を利用する。

4. 研究成果

適用事例として、スティック型サイクロン掃除機の 3D-CAD モデル (幅 225×奥行 155×高さ 1000mm, 部品点数: 34 部品) を用いる。本研究では、性能要求と環境要求を同時に満足する多目的設計問題を設定する。性能要求を掃除機の吸い込み仕事率、環境要求を環境負荷量 (CO₂ [kg], NO_x [kg], SO_x [kg]) の 3 目的とし、計 4 目的の要求性能を満足する多目的満足解集合を求める。

3D-CAD モデルのうち、ファン、吸い込み口部品、ノズルと吸い込み口部品の固定部品の 3 部品に注目し、それらの部品を構成する図 3 に示す (a) から (e) までの 5 つの設計変数を設定した。このとき、3D-CAD モデルは、パラメトリックモデルとして作成され、注目部品の寸法の変化に伴い、隣接する部品の寸法も変化することとする。例えば、ファンの直径が大きくなると、筐体の外形もその変化に対応して大きくなる。

まず、環境負荷評価システムにより、製品の材質とライフサイクルオプションを決定する。はじめに、初期条件として、す

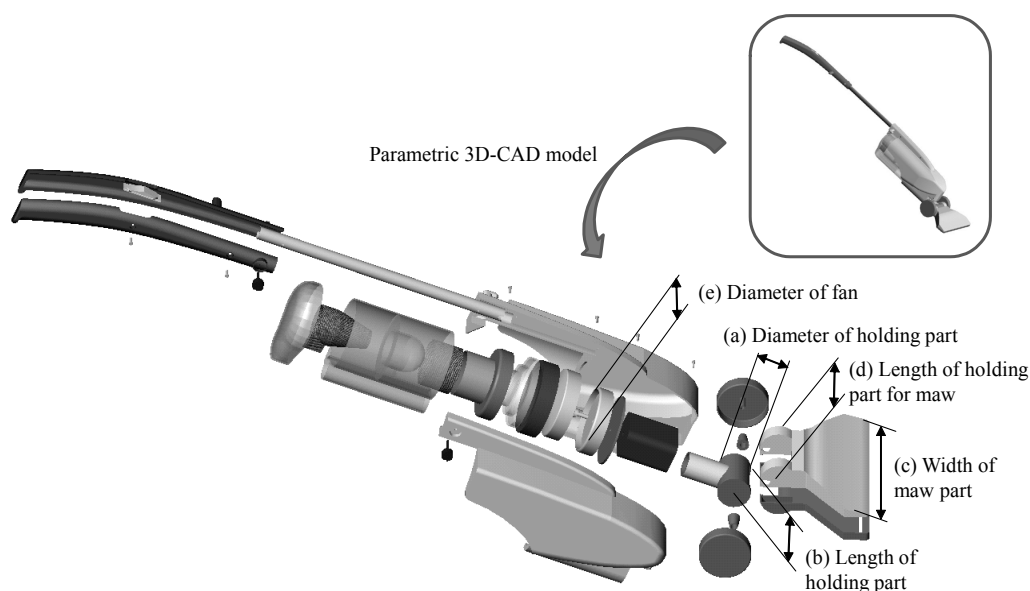


Fig. 3 Definition of design variables

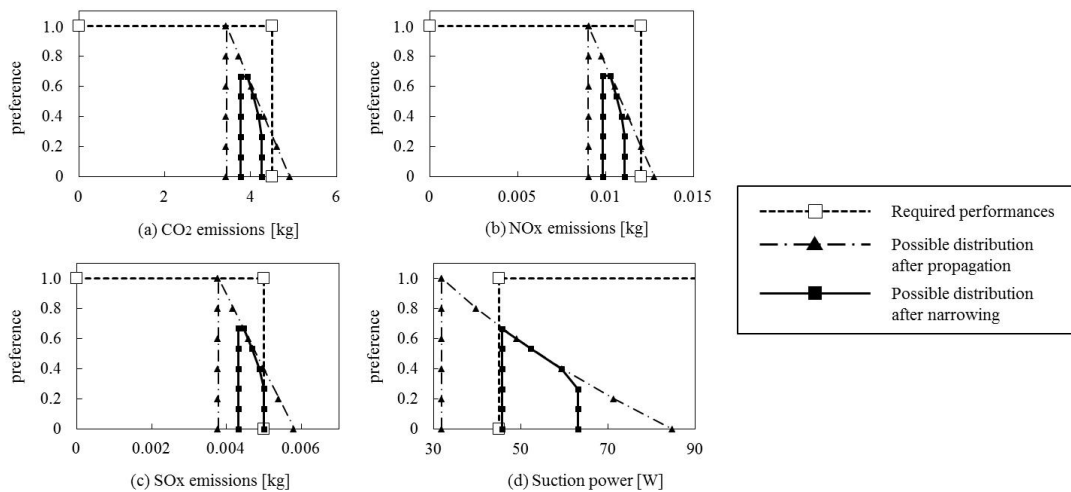


Fig. 4 Possible distributions of requirements

すべての部品のライフサイクルオプションを焼却廃棄するとして環境負荷評価を行った。その結果、CO₂排出量が大きいことが確認できたため、ポリプロピレンの材質からなる部品をマテリアルリサイクルとする設計案 A、第 1 世代をスペアパーツリユース、第 2 世代をマテリアルリサイクルとする設計案 B、マテリアルリサイクルと同時に材質を ABS 樹脂に変更する設計案 C のように、材質とライフサイクルオプションを修正しながら、環境負荷評価を行った。なお、3D-CAD モデルの寸法が大きくなると環境負荷量も大きくなる。本研究では、設計案 C の条件で、セットベース設計システムを実行した。

つぎに、設計者は、図 4 の破線で示されるように、図 3 の寸法情報を含む設計変数と要求に対して範囲と選好度を入力した。図 4 に示されるように、初期に入力した設計変数の範囲が達成する可能性分布（図 4 の一点鎖線）が、要求を満足しない（図 4 の破線で示される要求範囲から外れている領域が存在する）場合には、すべての可能性分布が要求範囲に入るまで、設計変数の範囲を絞り込む。

絞り込みを繰り返した結果、多目的な要求を満足する設計解集合が得られた。図 4 に示されるように、4 つの性能要求と環境要求を同時に満足する可能性分布（図 4 の実線）が得られていることが確認できた。設計者は、得られた設計解集合から、例えば、最も選考度の高い設計値を選択することで、設計解を選択することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

1. 柴田知世, 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, 製品のアップグレード設計への適合性評価(ノートパソコンの設計問題への適用), 日本機械学会論文集, (2017), 掲載決定済。

2. Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke and Masato Inoue, Upgradable Design for Sustainable Manufacturer Performance and Profitability and Reduction of Environmental Load, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 690-698, 2016 年 9 月。
3. Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke and Masato Inoue, Upgradable Design for Reduction of Production Cost and CO₂ Emission - Case Study of a Laptop Computer, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 761, pp. 589-593, 2015 年 5 月。
4. Masato Inoue, Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke, An Upgradable Product Design Method for Improving Performance, CO₂ Savings, and Production Cost Reduction: Vacuum Cleaner Case Study, *International Journal of Supply Chain Management*, Vol. 3, No. 4, pp. 100-106, 2014 年 12 月。
5. 井上全人, 山田哲男, 石川晴雄, 初期設計段階から性能と環境負荷削減を両立する 3D-CAD に基づくライフサイクル設計支援システム, 設計工学, Vol. 49, No. 10, pp. 543-549, 2014 年 10 月。

他 10 件

〔学会発表〕(計 64 件)

1. Shuho Yamada and Masato Inoue, Consideration of Reliability Issues within the Product Life Cycle Design, 2nd Symposium on Computational Reliability Engineering (CRE) in Product Development and Manufacturing, 2016 年 10 月 27 日。【招待講演】
2. 柴田知世, 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, 製品のアップグレード設計への適合性評価 - ノートパソコンの設計問題への適用, 日本機械学会 第 26 回 設計工学・システム部門講演会, 2016 年 10 月 9 日。
3. Stefan Bracke, Shuho Yamada, Yuki Kinoshita, Masato Inoue and Tetsuo Yamada, Decision Process within the Conceptual Design Phase of Eco-Friendly Products, 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2016), 2016 年 10 月 2 日。

4. Stefan Bracke, Simon Kutz, Masato Inoue, Hanno Gottschalk, Marcin Hinz, Edoardo Patelli, Christoph Hartl, Berna Ulutas, Pasascal Bonnaud, and Peter Mörs, Reliability Engineering in face of Shorten Product Life Cycles: Challenges, Technique Trends and Method Approaches to Ensure Product Reliability, European Safety and Reliability (ESREL 2016), 2016年9月25日.
 5. Masato Inoue, Shuho Yamada, Tetsuo Yamada and Stefan Bracke, Product Upgradability for Satisfying Future Performance, Low Price and Environmental Loads, and Manufacturer Profitability throughout the Product Lifecycle, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering (CIRP LCE 2016), 2016年5月22日.
 6. Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke and Masato Inoue, Satisficing Design Method for Sustainable Performance, Profitability for Manufacturer and Reduction of Environmental Loads, Proceedings of EcoDesign 2015 International Symposium, pp. 392-396, 2015年12月2日.
 7. Masato Inoue, Consideration of Reliability Issues within the product development phase, 1st Symposium on Computational Reliability Engineering (CRE) in Product Development and Manufacturing, 2015年10月22日【招待講演】
 8. 山田周歩, 中川淳, 山田哲男, 中野勝行, 井上全人, 企業の収益性と環境活動を両立するアップグレード製品設計手法 - リースパソコンへの事例適用, 日本機械学会 第25回設計工学・システム部門講演会, 2015年9月25日.
 9. Stefan Bracke, Masato Inoue and Berna Ulutas, Contribution for Analysing, Saving and Prioritising of Lessons Learned Issues Regarding Product Improvement and Future Product Generations, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2015), 2015年9月16日.
 10. Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Katsuyuki Nakano, Stefan Bracke and Masato Inoue, An Environmental Conscious Product Design Method for Sustainability of the Product's Value, Going Green - CARE INNOVATION 2014, 2014年11月18日.
 11. Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke and Masato Inoue, Upgradable Design for Reduction of Production Cost and CO₂ Emission - Case Study of a Laptop Computer, 3rd International Conference on Design and Concurrent Engineering (iDECON 2014), 2014年9月22日.
 12. 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, 生産時の環境負荷削減に向けたアップグレード製品設計手法, 日本機械学会第24回設計工学・システム部門講演会, 2014年9月19日.
 13. 高橋颯太, 岩崎誠和, 藤田光伸, 森孝男, 玉木基裕, 佐野明彦, 谷洋紀, 早川明宏, 井上全人, 自動車解体工場調査に基づくリユース部品使用時の環境負荷削減効果, 日本機械学会第24回設計工学・システム部門講演会, 2014年9月18日. 【(一社)日本機械学会 設計工学・システム部門 D&S コンテスト優秀表彰】
 14. Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke and Masato Inoue, An Upgrade Product Design Method for Satisfying Performance Criteria, Environment Load and Cost, The 3rd International Conference on Design Engineering and Science (ICDES2014), 2014年8月31日.
 15. Masato Inoue, Shuho Yamada, Tetsuo Yamada and Stefan Bracke, Upgradable Design for Various User Demands, 11th International Conference on Product Lifecycle Management (PLM 14), 2014年7月7日.
 16. 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, 異なるユーザ要求を考慮したアップグレード製品設計方法の提案, 日本設計工学会 2014年度春季研究発表講演会, 2014年5月24日.
- 他 48 件
- 〔図書〕(計 8 件)
1. Masato Inoue, Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke, Product Upgradability for Satisfying Future Performance, Low Price and Environmental Loads, and Manufacturer Profitability throughout the Product Lifecycle, Procedia CIRP, Elsevier, Volume 48, pp. 40-44, doi: 10.1016/j.procir.2016.03.015, (2016).
 2. Stefan Bracke, Masato Inoue, Berna Ulutas, Contribution for Analysing, Saving and Prioritising of Lessons Learned Issues Regarding Product Improvement and Future Product Generation, Procedia CIRP, Elsevier, Volume 40, pp. 179-184, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.095, (2016).
 3. Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke and Masato Inoue, Upgradable Design for Reduction of Production Cost and CO₂ Emission - Case Study of a Laptop Computer, Applied Mechanics and Materials, Vol. 761, pp. 589-593, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.761.589, (2015.05).
 4. Masato Inoue, Shuho Yamada, Tetsuo Yamada and Stefan Bracke, A Design Method for Product Upgradability with Different Customer Demands, Product Lifecycle Management for Global Market, Series: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 442, Springer, pp. 91-100, (2015).
 5. Stefan Bracke, Masato Inoue, Berna Ulutas and Tetsuo Yamada, CDMF-RELSUS concept: Reliable and Sustainable products - Influences on design, manufacturing, layout integration and use phase, Procedia CIRP, Elsevier, Volume 15, pp. 8-13, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.083, (2014). ISSN 2212-8271
- 他 3 件
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
井上 全人 (INOUE MASATO)
明治大学・理工学部・准教授
研究者番号: 60365468