自動車組立作業支援装置スキルアシストの実用化

鴻 巢 仁 司*¹ 荒 木 勇*² 山 田 陽 滋*³

Practical Development of Skill-Assist

Hitoshi Konosu*¹, Isamu Araki*² and Yoji Yamada*³

Modular component assembly has become a dominant trend in the final assembly process at automobile manufacturers. The modular component assembly system poses a problem of installation difficulty, since modular components are heavier and larger than individual parts. To solve this problem, a new type of assist device has been proposed, which reduces the operating force required by workers to install a large modular component on a vehicle body. This new device was named "Skill-Assist". Skill-Assist contains two electric actuators to meet horizontal operating force requirements. Actuator control emphasizes improved subjective operational feel, so that operators can manipulate Skill-Assist intuitively, making optimal use of the skills they have acquired through their work experience. Before Skill-Assist was actually applied to a cockpit module installation process, the risk-assessment protocol established in Europe was adopted to ensure the operator's safety which is essential for an assist device to work interactively with human operators in a shared workspace. Actual application has confirmed that Skill-Assist is effective not only in reducing the physical workload on human workers and installation work time requirements, but also in improving the subjective operational feel and utilizing workers' acquired skills. Further, Skill-Assists have not brought any hazardous situation due to the safety measures taken.

Key Words: Assembly Line, Module Installation Process, Power Assist Device, Impedance Control, Safety, Risk Management

1. は じ め に

近年、多くの自動車メーカーがモジュール化組付を推進している。モジュール化組付は、モジュール内部品の統合によるコストダウン、部品組付のために車両内乗り込み作業が減少することによる作業姿勢の改善等、様々な効果が期待されている。しかし、モジュール化されない部品と比較すると、最終搭載時の部品はサイズが大きくなり、重量も増加する。一般に、大型モジュール部品の最終搭載方法として自動化工程を採用する例が多く見られるが、自動化工程は、生産変動に柔軟に対応しにくい、設備トラブル時の復旧に時間を要する等の課題があり、理想的な工程とは言い難い。一方、作業員中心の組立工程は、作業の組み替え等の自由度も高く、フレキシブルな工程を実現しやすい。このような観点から、モジュール化に対応した上で、作業員の組立作業負担を低減する技術は、今後の組立工程の方向

性を考える上で重要な要素になると考える。これまで、人手による重量が大きい部品の搭載作業負担を低減するために、空気圧アクチュエータを用いたホイスト等の補助装置が活用されてきた。Fig. 1のような従来型補助装置は、部品を支持するための重力方向の作業負担、すなわち部品の重さ補助のみに着目してきたが、一般的な自動車組立ラインでは、コンベア上を移動

Fig. 1 Typical conventional assist device

原稿受付 2003 年 2 月 24 日

*¹トヨタ自動車株式会社

*²株式会社アラキ製作所

*³豊田工業大学大学院工学研究科

*¹Toyota Motor Corporation

*²Araki Manufacturing Co., Ltd.

*³Graduate School of Toyota Technological Institute

する車体に対して重量部品を搭載するための作業範囲が、コンベア移動方向に 5[m] 程度必要となり、装置全体を水平方向に移動させる必要がある。このような水平方向操作の作業負担は、これまでほとんど議論されてこなかった。結果として、一般的なパワーアシスト制御に関する研究（例えば文献 [1] [2]）が数多く見られるのに対し、水平方向操作の作業負担軽減を中心課題として捉えたアプローチはほとんどなされていない。しかしながら、水平方向操作の作業負担は、部品搭載の位置決めフェーズにおいて発生する慣性力によって部品搭載スキルが損なわれるために、生産性が低下したり、あるいは慣性力を抑えようとする作業者が腰痛等を引き起こすという意味で、対処すべき重大な問題であると同定されてきた。本稿では、このような重量部品搭載時の水平方向移動から組み付けまでの人による作業を支援するために実用化された装置について報告する。

2. スキルアシスト

人が物体を水平方向に動かすときの作業負担を、操作力の最大値と考えると、その支配的な要因は慣性であると考えられることができる。Fig. 2 に従来の装置を操作したときの操作力と加速度の関係を示す。操作力が加速度の変化に相似しており、慣性の法則に従うことが分かる。Colgate ら [3] および Akella ら [4] は、操作時の進行方向修正に伴う負荷を低減する Virtual Wall を電気モータにより車輪軸制御することで造り出し、水平移動の作業負担を低減することを提案している。しかしながら Virtual Wall は、Inertia Management と表現されているように、操作性の改善に大きく貢献するものの慣性低減を図るものではなく、操作力低減による作業負担の軽減の十分な対策とは考え難い。一方、ワイヤで部品を吊る構造を持つホイス型装置では水平方向操作力を低減する技術が出始めている [5]。しかしホイス型装置は、運搬物の姿勢を拘束できない上に、車両内に部品を持ち込むためのオーバーハング構造を作れないという構造上の問題から、大型の室内モジュール部品を搭載する作業には適さない。前章でも述べたように、室内に乗り込む作業負担を軽減するというモジュール化のメリットをより生かすためには、内装部品こそモジュール化が推進されるべき対象であると考えられ、内装モジュール搭載を前提にしたアシスト装置の検討が必要である。これらの課題を解決するために、「水平方向動作の慣性負荷に対する対策を考案することで、作業負担を適正レベルに軽減した上で、作業者のスキルを最大限に引き出す」ことを基本コンセプトとして、下記 3 項目を満たすまったく新しい補

助装置の開発に取り組んだ。

1. 大型モジュール部品を水平方向に大きく動かし、コンベア上を連続的に移動する車両に搭載する作業を対象とする。
2. 操作者の意図通りの動きを実現するため、大型モジュール部品の搭載において移動スイッチやボタン操作を必要としない直感的な操作の中で操作力アシストを行う。
3. 操作フィーリングの向上により、作業者のスキルをより引き出すことが可能になると考え、補助装置のインピーダンス特性を作業者の望む特性として調整することで、作業者の操作フィーリングを向上させる。

これらは作業者のスキルをアシストするための技術要件であることから、この新しく開発される補助装置を“スキルアシスト”と名づけた。

3. スキルアシストの設計

スキルアシストとして前述のコンセプトを実現するため、まず、アシスト制御方法の基礎研究に取り組んだ [6]。1 自由度アクチュエータを用いた基礎研究から、下記のことが見出されている。

- 物体を速く遠くへ移動させたい作業フェーズに適する装置の動特性と、微細な位置決めをしたい作業フェーズに適する動特性は異なる。
- これら作業フェーズを、操作時の速度パターンから自動認識できる。
- 自動認識された作業フェーズに基づき、装置の動特性を作業途中で切り替えることで、操作フィーリングが良く、より速く、精度の高い位置決め作業を達成できる。
- そのときの操作力パターンより、適切な操作力パターンを定義できる。Fig. 3 に、基礎研究で見出された適切な操作力パターンの一例をその特徴とともに掲げる。

この基礎研究結果を踏まえ、以下の小節に順に示す項目をそれぞれ考慮の上、実際の組立ライン適用を前提としたスキルアシストの設計を進めた。

3.1 制御ソフトウェア

アシスト制御を実現するためのソフトウェアは、基礎研究の結果に基づき、先のコンセプト 4 に対応することを重視し開発を

Fig. 2 Actual operating force when we operate the conventional assist device

- (1) The force maintains a positive value toward positioning.
- (2) In the first half of operation, the force and acceleration curves are almost identical.
- (3) In the second half, the force decreases gradually.
- (4) It varies smoothly from starting to positioning.

Fig. 3 Feature of desirable operating force

(a) Phase distinction in a task process

(b) Variable impedance control

Fig. 4 Phase-dependent impedance control

進めた。筆者らは、操作力アシストシステムにおける操作フィーリングの重要性を指摘してきた [6]。年齢、筋力、体格などにおいて様々な特性を持つ多くの作業者が自らのスキルを発揮し、作業の実感を持つことができ、作業に満足感を感じられるアシストを実現するため、可動部全体の慣性、粘性摩擦特性を可変とすることで、操作フィーリングを任意に造り出せる機能が重要であると考え。自動車組立作業における作業者のスキルを、“人の身体関節の慣性、粘性、剛性の作業に応じた適切な変化の仕方の獲得”と定義できるとすると [7]、このスキルアシスト制御法は、人と機械の動特性のマッチングを図れることになり、前記技術要件 3 を議論する上で非常に有効であると考え。具体的には、Fig. 4 (a) に示すように、1 回の部品搭載作業を、その速度パターンに応じて三つのフェーズに分割識別し、それぞれのフェーズごとに式 (1) で表される所望の機械インピーダンス特性が反映されるようなフェーズ・インピーダンス制御 [8] を用いて、アシスタクチュエータの制御力 f_u は式 (2) によって与える。

$$F = M_d \cdot \ddot{x} + D_d \cdot \dot{x} \quad (1)$$

$$f_u = \left(\frac{M_n}{M_d} - 1 \right) \cdot F + \left(D_n - \frac{M_n}{M_d} \cdot D_d \right) \cdot \dot{x} + F_c \cdot \text{sgn}(\dot{x}) + F_s \cdot \delta(\dot{x}) \cdot \text{sgn}(F_{imp}) \quad (2)$$

ここで、 x はスライダの変位、 M_d は所望の質量特性、 D_d は所望の減衰特性である。また、式 (2) における M_n 、 D_n は、それぞれアクチュエータ可動部の質量、粘性係数として同定された値であり、同式第 3、第 4 項は、非線形な乾性動摩擦係数 F_c 、 $\dot{x} = 0$ における静止摩擦力 F_s に対する補償入力項をそれぞれ表している。さらに、 F_{imp} は、手先部の操作力と反力の和、すなわち最終的にスライダに作用する力を表している。先に述べた基礎研究の結果に基づき、式 (1) の M_d 、 D_d を一連作業

Fig. 5 Overview of a Skill-Assist

内の作業フェーズに従い、Fig. 4 (b) にあるように作業フェーズごとに変化させる。

3.2 ハードウェア

機械ハードウェア

- 車室内に大型モジュール部品を搭載するため、部品姿勢を拘束できる高剛性の構造を持つ。
- 室内に大型モジュール部品を搭載する際に、厳しい隙をクリアしなければならないが、それでも作業を容易に達成できるようにするために、回転動作部以外は直線的に動作させる必要があるため、アームリンクの円弧動作を避け、直交自由度 XYZ とする。

電気ハードウェア

- 作業者の操作意図に沿った柔軟な操作を高い制御性のもとに実現するために、アシスト駆動ユニットは、高い応答性を備え、さらに、力、トルクの伝達ロス可能な限り低減させる。
- アシストのための力制御を安定させるため、制御周期の短縮を図る。

スキルアシストの基本構造の概要を Fig. 5 に示す。インストゥルメントパネルモジュール搭載作業に適応する高剛性のオーバーハング構造を有する。X-Y 軸にはスキルアシスト用電動アクチュエータを、Z 軸はエア式アクチュエータを備え、回転動作部は受動機械要素のみで構成される。Z 軸は電動アクチュエータを使用せずとも、従来技術で対応が可能と考えた。また、回転動作は X-Y 軸の動作によりカバーすることができる。アシスト用の電動アクチュエータとしては高い応答性を実現でき、制御性の高いダイレクトドライブ式リニアモータを採用した。このアクチュエータはコントローラから力制御される。操作ハンドル部根元には力制御への入力信号となる力センサを備え、作業者の操作意図が反映された操作力ベクトルを検出する。コントローラはアシスト制御専用の CPU を内蔵し、サンプリング周波数が 1 [kHz] を超える高速制御を行う。スキルアシストコントローラのシステムブロック図を Fig. 6 に示す。同図においては、力センサ信号がセンサコントローラを介して CPU に入力され、先に述べた作業者の操作フィーリングに影響の大きい操作ハンドル地点における慣性、粘性の変化を与える計算が行われる。そして計算結果は、A/D 変換を経由してモータドライ

Fig. 6 System block diagram of Skill-Assist

バへと出力される。同図では、後の安全に関する議論の項で述べられる安全回路、およびデッドマンスイッチのコントローラとして、PLC 回路が大きな役割を演じていることが示されている。この PLC 回路は、I/O を介して CPU および周辺装置としてのコンベアのコントローラにそれぞれ接続されている。

4. 導入検討

実ライン適用のために設計されたスキルアシストにおいて、基礎研究の中で提案してきたスキルアシストの制御方法 [6] が、実際のモジュール部品搭載作業に適用できるか検討を行った。対象となるインストゥルメントパネルモジュール搭載作業として、約 40 [kg] の部品重量を前提とした。

対象物を速く、かつ比較的長い距離を搬送したい作業フェーズに適する慣性特性、および微細な位置決め作業フェーズに適する粘性特性を実現した際の操作力の変化を Fig. 7 に示す [6]。同図で用いられる単位について、操作力は一般に絶対値で表されることが多いが、作業負荷として慣性負荷を捉えるには、絶対値ではなく操作加速度で標準化して扱われるべきであるとの立場に立って、ここでは操作力を加速度 $0.98 \text{ [m/s}^2\text{]} (0.1 \text{ [G]})$ に標準化して扱っている。同図 (a) のアシストなしのときの操作力と比較すると、(b), (c) いずれの場合も操作力低減が図られていることが分かる。また操作力の変化パターンは、慣性特性時は加速度の変化パターン、粘性特性時は速度の変化パターンに類似しており、それぞれの作業フェーズにおいて互いに異なる操作フィーリングが作り出せていることが分かる。

5. 安全化の取り組み

スキルアシストを実際の生産ラインに導入する前に、操作者の安全確保の問題を議論しなければならない。ここでは、欧州を中心に安全管理の規範となっているリスクアセスメントの考えを取り入れ、実用化前例のない本システムのための安全機能についての議論を進めた。開発を担当する生産技術部門、安全管理部門、本システムを日常的に使用することになる製造（組立）部門、装置製造会社のスタッフが幾度となく集まり、時に学識者にも指導を仰ぎ、リスク解析—リスク評価—リスク低減のサイクルを繰り返し、スキルアシストの操作者にとって許容さ

Fig. 7 Operating force patterns when the dynamic characteristics of a Skill-Assist are varied

Fig. 8 A principal part of FTA for risk assessment of Skill-Assist with implemented countermeasures

れうるリスクレベル、およびその達成手段について議論を重ねた。Fig. 8 は、FTA を使い、制御系のリスク源を解析したものを簡素化して表したものである。同図はハザードに至る主要因がスキルアシスト側のシステムエラー、オペレータ側のエラー、ヒューマンインターフェースの不整合、そして操作法に不案内な第3者の介入の4項目であることを示している。これらのうちのいずれか、あるいはいくつか重なって共存系にエラーが生じたとき、さらに機械的な危害要素の操作者との接触が直接の原因となって、人に傷害が及ぶ結果になると解析された。

このようなリスク解析に基づき、関係者によって本システムのリスクレベルが十分許容できると合意されるよう、様々な安

全対策が織り込まれた。最終的には以下の諸項目のようにまとめられた対策の実施により、許容可能なリスクレベルが実現できると判断し、これらの対策を施した。

① 人の動作意思に忠実なアシスト機能の実現

- 高い操作フィーリングの実現による、人の意思に忠実な動作軌道の達成
- 高速制御処理による応答遅れの払拭

② 制御回路の異常検知機能の実現

- 力センサ、アシスト制御コントローラに対するウォッチドック機能の装備
- モータドライバ内の故障に対する異常モータ電流検知機能の装備

③ 万一の場合は即座にアシスト機能を停止できる停止機能の実現

- 高信頼なデッドマンスイッチの採用
- 高信頼な非常停止回路の採用

④ 動作中に停止機能が働いた際、アシストなしの本来の動特性が急に現れることに対するインターロック

- 外部メカブレーキとの連動
- コンベア停止機能との連動
- 瞬秒後のメカブレーキ解除による制動開放機能の付加

Fig. 8 内に矢指するように、システムエラーの中で、通信エラーには高い信頼性の実績があるので、その他の三つの中間事象について誤作動を未然に防止する対策を図った（対策②）。ただし、リスクアセスメントに基づく安全対策のカテゴリ対応が十分でない機能を補うためにデッドマンスイッチを設置している（対策③）。ヒューマンエラー系に関する対応は、人のスキルベースのエラーを補う機能を今後に向けて検討中である [9]。ヒューマンインターフェース系については、スキルアシストの基本コンセプトである操作フィーリング向上が特に重要と考えた（対策①）。また、作業中に安全停止機能が働いた際の急激なシステムの挙動変化に対応することを考慮した（対策④）。

これらの対応のために、Fig. 6 には安全対策の実施に必要な安全回路が組み込まれている。さらに、残存リスクを明確にし、使用部署、使用者に正確に伝えた上で、残存リスクを前提にした日常管理を実施している。

6. スキルアシストの導入と効果

前述した安全対策が実施された後、スキルアシストは、インストゥルメントパネルモジュール搭載用補助装置として実際のラインに導入された。インストゥルメントパネルモジュールは、今後、サブアッシー化される部品が増え、重量、サイズとも増加する傾向にある。また、大型化したインストゥルメントパネルモジュールは搭載する際の車体との隙も少なく、スキルアシストの基本コンセプトである「作業者のスキルを引き出すこと」の必要性が高い。スキルアシストが実際のラインに導入され、操作されている様子を Fig. 9 に示す。Fig. 10 に実際の搭載作業における操作力の変化の様子を示す。同図 (a) は、(b) に示したように 1 モジュール部品（インストゥルメントパネル）を車体フレーム内に搬送、搭載・位置決めし、スキルアシストを初期位置に戻すまでの各作業フェーズ①～⑥に対応した実測操作

Fig. 9 Skill-Assist at cockpit module installation process on actual assembly line

(a) Operational force pattern in correspondence with acceleration pattern

(b) Operational phase ①～⑥

(c) Detailed operational force pattern in operation phase ③

Fig. 10 Operating force at actual operation on cockpit module installation

力（大きさ）の典型的なパターンを示している。注目すべきは、搭載・位置決めフェーズにおける操作力パターンであり、これを同図 (c) に示す。操作力は加速度パターンと類似した立ち上がりを示した後、負の値を示すことなく位置決め作業を完了している。これは、Fig. 3 に示した適切な操作力パターンの特徴と一致する。この操作力の特徴より、実際の作業の中で高い操作性が実現できていることが分かる。加速度で標準化した操作力、搭載に要する作業時間を従来式補助装置と比較した結果を Fig. 11 に示す。これらは、実際に作業に従事している操作者 4 人全員の平均値として示されている。同図 (a) には加速度で正規化された操作力の最大値の平均が、同図 (b) には、所要タスク時間の平均がスキルアシスト導入前のそれらと対比して示されている。操作力が約 57%、作業時間が約 33% 低減されていることが分かる。また Fig. 12 は、再び操作者 4 人を対象として、7 件法によるアンケートを取った結果の典型例である。同図 (a)～(d) に示される定義は、それぞれ搭載作業時のフィーリングとして、(a) 起動の容易性、(b) 移動速度の制御性、(c) 軌

(a) Contrast of operating force normalized by acceleration

(b) Contrast of task time

Fig. 11 Contrastive operational force and task time between conventional assist device and Skill-Assist

(a) Start up responsiveness (b) Motion speed controllability

(c) Trajectory tracability (d) Ease of positioning

Fig. 12 Workers opinion about Skill-Assist operation feeling

道トレースの容易性, (d) 位置決めの容易性を表している。アンケート結果には, 作業員ごとの個人差としてそれぞれの項目にたかだか 1 得点の差が認められただけであったため, Fig. 12 ではその典型例を示すに留めた。いずれの作業員からも, およそ全項目に対してスキルアシスト導入後は, 最高得点が得られており, スキルアシストが作業員から高い評価を受けていることが分かった。さらに, 実際にラインに導入されたスキルアシストは 2001 年 5 月の導入以来, 機能故障もまったくなく稼動を続けている [10]。

7. おわりに

作業員がスキルを発揮できるようにアシストを行う, という新しいコンセプトに基づいて提案されたスキルアシストを開発し, 実際のインストルメントパネルモジュール搭載作業を目的として開発し, 実用化した。本開発の成果を以下にまとめる。

- スキルアシスト制御法として, 操作フィーリングを向上させるためのアシストモータ制御方法を, 実際の作業に適されるハードウェア上において実現した。
- 人と共存し, 作業をアシストするまったく新しい動力を持つ装置に対する安全システムを構築した。
- スキルアシストのコンセプトの有効性を実際のライン作業への適用により実証した。確認された効果を以下に示す。
 - ー操作力低減による作業負担の低減
 - ー作業時間の短縮
 - ー操作者の操作フィーリング向上

これらの結果から, 作業員のスキルを引き出すべく作業負担を低減するというスキルアシストの基本コンセプトの有効性が実際のラインに導入し評価したことによって確認されたことを報告する。

今後は, 本システムを重量の増加, サイズの増大が予想されるほかのモジュール部品に展開するとともに, システムの簡素化に取り組む予定である。また, リスク解析で課題として残されているヒューマン・エラー対策は, 今後, スキルアシストの適用作業分野が拡大され, さらに厳しい作業条件の下で使用されるようになった場合に, いよいよ軽視できなくなるものと予想される。ヒューマン・エラーによる未然の事故防止 [9] についても現実問題に即した技術対策を立てつつある。

謝 辞 スキルアシストの実用化に先立ち, 本装置立案の段階から協調・安全に関する技術までご指導を頂きました元豊田工業大学教授梅谷陽二氏, および豊田工業大学助手森園哲也氏に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] H. Kazerooni: "Human-Robot Interaction via the Transfer of Power And Information Signals," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol.20, no.2, pp.450-463, 1990.
- [2] K. Kosuge, et al.: "Robot-Human Collaboration for New Robotic Applications," Proc. of IECON'94, pp.713-718, 1994.
- [3] J.E. Colgate, et al.: "Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators," Proc. of ASME Dynamic Systems and Control Division, vol.DSC-58, pp.433-440, 1996.
- [4] P. Akkela, et al.: "Cobots for The Automobile Assembly Line," Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.728-733, 1999.
- [5] "i-Trolley," <http://WWW.cobotics.com>
- [6] Y. Yamada and H. Konosu: "Proposal of Skill-Assist: A system of Assisting System for Human Workers by Reflecting Their Skills in Positioning Tasks," Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.IV11-16, 1999.
- [7] N. Hogan, Impedance Control: "An Approach to Manipulation: Part I-III. Trans. of the ASME, Journ. of Dynamic System Measurement and Control," vol.107, no.1, pp.1-24, 1985.
- [8] 山田陽滋, 鴻巣仁司 他: "自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案", 日本機械学会論文集 C 編, vol.68, no.666, pp.509-516, 2001.
- [9] 山田陽滋 他: "隠れマルコフモデルに基づいた証拠理論による事故防止方法", 第 7 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.167-172, 2002.
- [10] H. Konosu: "Skill-Assist: Helping Human Workers with Automobile Modular Component Assembly," 2002 SAE World Congress, 2002.

鴻巢仁司 (Hitoshi Konosu)

1966年8月16日生。現在、トヨタ自動車(株)生技開発部勤務。1997年4月～1999年3月豊田工業大学大学院修士課程在学中は、知能ロボットの研究に従事。
(日本ロボット学会正会員)

山田陽滋 (Yoji Yamada)

1956年7月13日生。1983年名古屋大学工学研究科修士課程修了。同年より豊田工業大学助手勤務。1993年助教授。同年、Stanford University 客員研究員。工学博士。ロボットのセンサ、通信、知能システムの研究に従事。日本機械学会、IEEEの会員。
(日本ロボット学会正会員)

荒木 勇 (Isamu Araki)

1947年8月2日生。1970年名城大学機械工学科卒業。同年4月愛知県豊田市の(株)アラキ製作所に入社。主に自動車生産ラインの搬送装置、重量物搭載補助設備の設計に従事。1978年9月取締役役に就任。現在取締役社長。(日本ロボット学会正会員)