

人と安全に共存・協働するためのロボットシステムと
実生産ラインへの応用に関する研究

2021年 3月

吹田 和嗣

人と安全に共存・協働するためのロボットシステムと
実生産ラインへの応用に関する研究

吹田 和嗣

システム情報工学研究群

筑波大学

2021年 3月

論文概要

急峻に進展している少子高齢化問題、価値観の多様化への対応など日本での産業界の課題は重く、大きい。モノづくり分野では人作業の付加価値向上と多種少量生産への対応が急務であり、人とロボットが物理的に互いに意思を持って助け合うことが重要と考えている。本研究の立ち位置は人への安全な直接的物理的な支援を目的とし、共存・協働といった新領域を産業用ロボットの分野からアプローチするものである。そのためには、より直接的な支援が必要なサービスロボットと産業用ロボットの連携性が今後さらに重要になると考えている。本研究では、「人とロボットは安全にふれあい、自律性をもった共存、協働作業ができるのか？」という問いに対して以下の3つの学術的研究課題を検証する：

- 【1】身体的安全性を確保するために人の感じる感覚をアラート指標として記述し
- 【2】その感覚を取り込んだロボットシステムが人との安全な接触が可能であることを示し
- 【3】実際の生産ラインで安全性と生産性が両立できることを実証

身体的安全性を確保するために、人の知覚特性のなかで安定した感覚であり、身を守るアラートとして痛覚に着眼した。これは可逆性のある最大感覚で人の身体が正常に回復できると考え選定した。人体の各部位に対して人間工学実験を適用し、安全に触れ合うための必要条件を明確化した。実験方法は空気圧シリンダで機械的刺激量を徐々に増加させる方法とハンマー式試験法を併用し、被験者が痛みを感じた場合の刺激量を痛覚耐性値とする方法を提案した。痛覚耐性感覚を取り込んだロボットシステムが人との安全な接触が可能であることを示すため、人とロボットの接触シミュレーションを実施した。ロボットの被覆材質が硬い場合、接触時の衝撃力が高くなり痛覚耐性値を超える問題が明らかとなった。また、柔らかい材質の場合でも時間が経過するとロボットに挟まれる力が増加し、痛覚耐性値が超えてしまう問題も明らかとなった。

そこで、衝撃力を緩和し、かつ早く接触検出することでロボットを停止させることに取り組んだ。この取り組みは人とロボットの機械的インピーダンスマッチング問題ととらえて設計プロセスを構築した。安全な接触検出と停止能力を踏まえたロボットシステムの被覆設計方法を示した。人とロボットの接触を記述するために表面が粘弾性体のロボットに半楕円体の接触モデルをと考え、人との一般的な接触モデルを採用した。早い検出力を確保でき、かつ痛覚耐性値を超えないロボットの被覆の粘弾性における境界条件を導き、その中で最も機械的インピーダンスが低く安全性が確保できる粘弾性材料を選定し実際のロボットへ適用した。開発したロボットシステムが人の痛覚耐性の感覚を取り込んだシステムとして成立性することを検証した。産業用途に資する安全性を確保するためにシステム全体の制御系を多重化して信頼性を確保できる構成とした。人体への接触実験をした結果、設定した痛覚耐性値50N以下である20N程度で確実に停止でき、人との安全な接触が可能であることを実証した。

本研究をベースにISO/TC299/WG3にて協働ロボットの安全規格制定に向けた審議を開始した。日本では国際安全規格発行前に準拠指令が2013年に発令された。2015年は多くの協働ロボットがリリースされ、2016年に国際規格ISO/TS 15066が制定された。安全規格と産業応用分野での整備が完了した。

自動、共存、協働の特長を整理した場合、自動は空間分離が必要であることに対し、共存では空間を共有でき、協働では作業空間のラップや作業タイミング、加工点が同じとなり、その形態で同期、協業、協調にレベル分けされ、より直接的な連携や生産性向上のメリットがある。一方で、人と接触する機会が増えることで、安全性と生産性の両立が問題となる。市販の協働ロボットを活用し実ラインでの実証を進めた。適用した工程は自動車のハイブリットインバータの補給パーツラインとした。本ラインは極少量生産でプロセス数が非常に多く、熟練技能を有する高齢者や女性で対応している。作業のタスクレベルと人への肉体的、精神的な負担感を考慮し、人とロボットの作業分担計画を行った。協働作業としてスキルが必要な作業は人、タスクレベルが低い作業はロボットで分担し、作業の並行処理を可能とした。また、ワークを保持する作業に協働ロボットを活用することで組付けしやすい作業姿勢を提供し、作業性向上が確認できた。さらに、ワイヤーハーネスを配策しながらネジ締めする高度なスキルが必要な作業を人とロボットとの協調作業で簡便に実現できることを実証した。

安全性の評価については人の痛覚耐性値を踏まえた安全性とその妥当性確認方法を提案した。ワークや治具などのエッジ部との挟まれを含むリスクアセスメントを実施し、提案する安全基準を満足する対策方法と具体的な妥当性確認方法を示した。実ラインでの実証結果として、重量物等のエルゴ作業やタスクレベルが高い複合作業など負担感のある作業プロセス数を協働ロボットの積極的活用により、約60%程度低減できた。また、生産性の評価については作業プロセス数を人とロボットで分担することで自動化、共存、協働化の効果とあわせて約44%低減できた。安全性は確保したうえで、人への負担感(エルゴ、気遣い)の低減と生産性向上としてプロセス数の低減の両立できることを明らかにした。

本研究のまとめとして、身体的安全性を確保するために人の痛覚耐性をアラートできる指標として統一的に記述し、その感覚を取り込んだロボットシステムの設計手法を提案し、人との安全な接触が可能であることを示し、実際の生産ラインでしくみの整備とあわせて安全性と生産性が両立できることを実証した。今後の社会的な展開として、意図した接触規範、例えば触れ合うことを前提とした物理的な支援への適用が期待される。また、接触する前にロボットが人の動きや意図を理解し、自律的な行動を実行できるしくみ構築が必要と考える。人とロボットのインタラクションがより高度化し、人を中心にとらえてロボットと協調するの仕組みの構築が今後の大きなテーマである

目次

第1章 緒言	1
1.1 背景とねらい	1
1.1.1 社会的背景～少子高齢化社会の進展	1
1.1.2 社会的背景～変種変量生産への対応	3
1.2 研究の位置づけ	4
1.2.1 社会的及び学術的意義	4
1.2.2 モノづくり分野での研究意義	6
1.3 人とロボットの共存・協働	9
1.3.1 人とロボットの共存・協働～安全に関わる関連研究	9
1.3.2 人とロボットの共存・協働～モノづくりのあり方の関連研究	10
1.4 共存・協働のための研究課題とアプローチ	12
1.4.1 本論文の問いと学術的研究課題	12
1.4.2 本論文の構成	13
第2章 人とロボット共存・協働のための安全基準構築	15
2.1 安全基準としての人の痛覚耐性	15
2.1.1 共存・協働のための予防安全	15
2.1.2 安全空間としての痛覚	16
2.2 痛覚耐性の実験方法	16
2.2.1 痛覚レベルの耐性値	16
2.2.2 痛覚耐性値解明のための実験方法検討	17
2.2.3 痛覚耐性値の測定～準静的な許容挟圧力	19
2.2.4 痛覚耐性値の測定～過渡的な許容衝撃力	21
2.3 人の痛覚耐性値の統一的記述	23
2.3.1 衝撃時間と衝撃力に基づく統一的記述方法	23
2.3.2 変形速度と変形量に基づく統一的記述方法	24
2.4 ロボット安全基準としてのまとめ	26
2.4.1 痛覚耐性値の記述方法のまとめ	26

2. 4. 2 国際規格化と産業応用への展開.....	26
2. 4. 3 まとめ	27
¶ 倫理規定への対応.....	27

第3章 安全基準を踏まえた共存・協働ロボットシステム..... 28

3. 1 安全な人との接触を考慮したシステムの構築.....	28
3. 1. 1 人との共存・協働システムの先行研究と本研究のコンセプト.....	28
3. 1. 2 想定する共存・協働作業.....	29
3. 1. 3 本研究における痛覚耐性値の設定.....	30
3. 1. 4 人とロボットの接触シミュレーションとその結果.....	32
3. 1. 5 痛覚耐性感覚を取り込んだロボットシステムの設計プロセス.....	34
3. 2 ロボットの動的特性の把握.....	35
3. 2. 1 外乱オブザーバを用いたフェイルセーフな接触検出.....	35
3. 2. 2 最小二乗法によるシステム同定.....	39
3. 2. 3 センサレスによる接触検知と停止機能の確認.....	43
3. 2. 4 被覆の厚さと実行可能性の確認.....	45
3. 3 ロボットの粘弾性被覆設計.....	45
3. 3. 1 粘弾性体被覆への接触シミュレーション.....	45
3. 3. 2 接触メカニズム.....	45
3. 3. 3 粘弾性被覆の材料選定.....	49
3. 4 安全なロボットシステム制御.....	51
3. 4. 1 安全システム構築の考え方.....	51
3. 4. 2 外力検出の2重化.....	51
3. 4. 3 安全な接触検知システムの全体構成.....	53
3. 5 協働作業を想定した安全性評価.....	54
3. 5. 1 粘弾性被覆を採用したセンサレス接触検知特性.....	54
3. 5. 2 人との接触検知と停止実験.....	56
3. 6 安全な接触検出と停止制御システムの検証とまとめ.....	58
3. 6. 1 提案システムの検証結果.....	58
3. 6. 2 今後の展望～観測すべき物理量.....	58
3. 6. 3 今後の展望～ロボットの制御方法.....	59
3. 6. 4 まとめ.....	60

¶ 倫理規定への対応	60
第4章 安全な人との共存・協働ロボットシステムの実生産ラインへの適用	61
4.1 社会的要請と産業応用展開.....	61
4.1.1 共存・協働化のための安全規格整備状況	61
4.1.2 共存・協働化の実証アプローチ	62
4.2 実用化に向けてのステップ	63
4.2.1 モノづくり分野における背景と共存・協働化	63
4.2.2 自動車製造における共存・協働適用工程の検討と要件	64
4.2.3 共存・協働作業の適用対象工程の選定	67
4.2.4 選定工程の作業プロセス分析.....	70
4.3 協働作業における安全性検証と妥当性確認.....	74
4.3.1 安全性検証と妥当性確認のステップ	74
4.3.2 リスクアセスメント Step1～機械制限の確認.....	76
4.3.3 リスクアセスメント Step2～危険事象の同定	78
4.3.4 リスクアセスメント Step3～リスクの見積もりと低減.....	79
4.3.5 リスクアセスメント Step4～リスクの評価と妥当性確認.....	82
4.3.6 リスクアセスメント Step5～リスクの低減と妥当性確認.....	88
4.3.7 リスクアセスメント～使用者におけるリスク低減	92
4.4 実ラインへの適用と評価	92
4.4.1 開発ラインの概要.....	92
4.4.2 適用した共存・協働作業.....	93
4.4.3 生産性向上の実証結果	95
4.5 実ラインでの実証結果の考察とまとめ	96
4.5.1 実ライン適用の振り返り.....	96
4.5.2 今後に向けた取り組み.....	97
4.5.3 まとめ	98
第5章 今後の展望.....	99
5.1 人とロボットの安全なふれあいと助け合い.....	99
5.2 人との協働を深化させるための安全基準の充実	100

5.3 将来の共存・協働ロボットの展望.....	101
5.4 人とロボットの共進化社会への期待.....	105
5.5 まとめ	107
第6章 結言	108
謝辞.....	110
参考文献.....	112
研究業績目録	119
用語・記号の定義.....	120

第1章 緒言

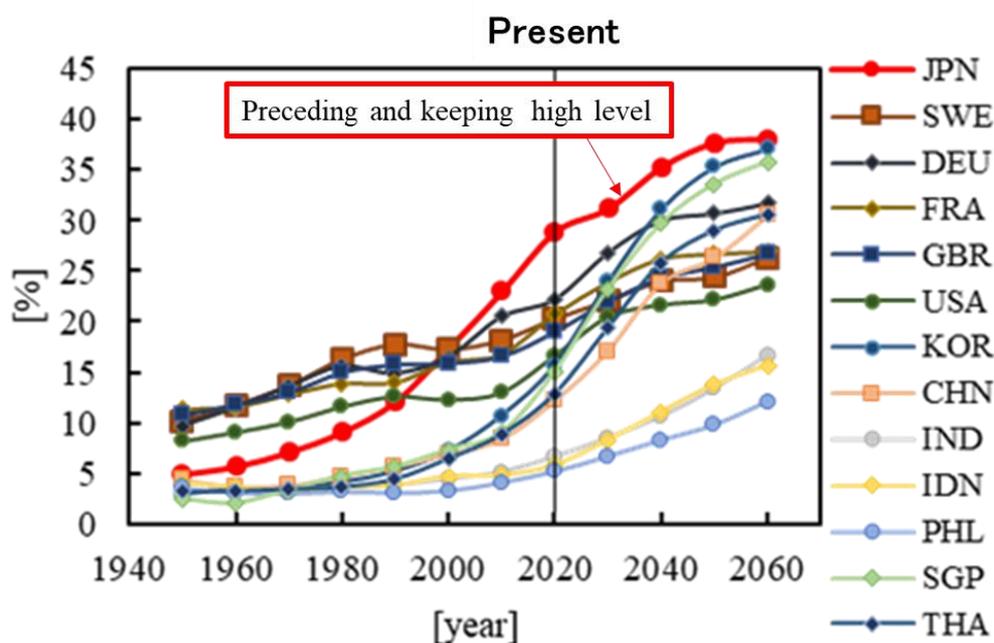
1.1 背景とねらい

1.1.1 社会的背景～少子高齢化社会の進展

少子高齢化、ダイバーシティへの対応など社会的課題解決の必要性がますます強くなる中、我々自動車製造の業界では人作業の付加価値向上のために「待ったなし」のところまで来ている状況と認識している。

高齢化の流れは図1-1に示すように60歳以上の人口比率は日本が先行し、かつ急峻にやってくる。グローバルでも各国はこの流れを追従していくことが予想される。特にアジア地区の一部の国では日本を上回るスピードで高齢化が進むことが見込まれている[1]。日本がこの問題に対して先行して取り組むことで、グローバルにその対応の仕組みや技術を展開、貢献できる可能性が期待される。

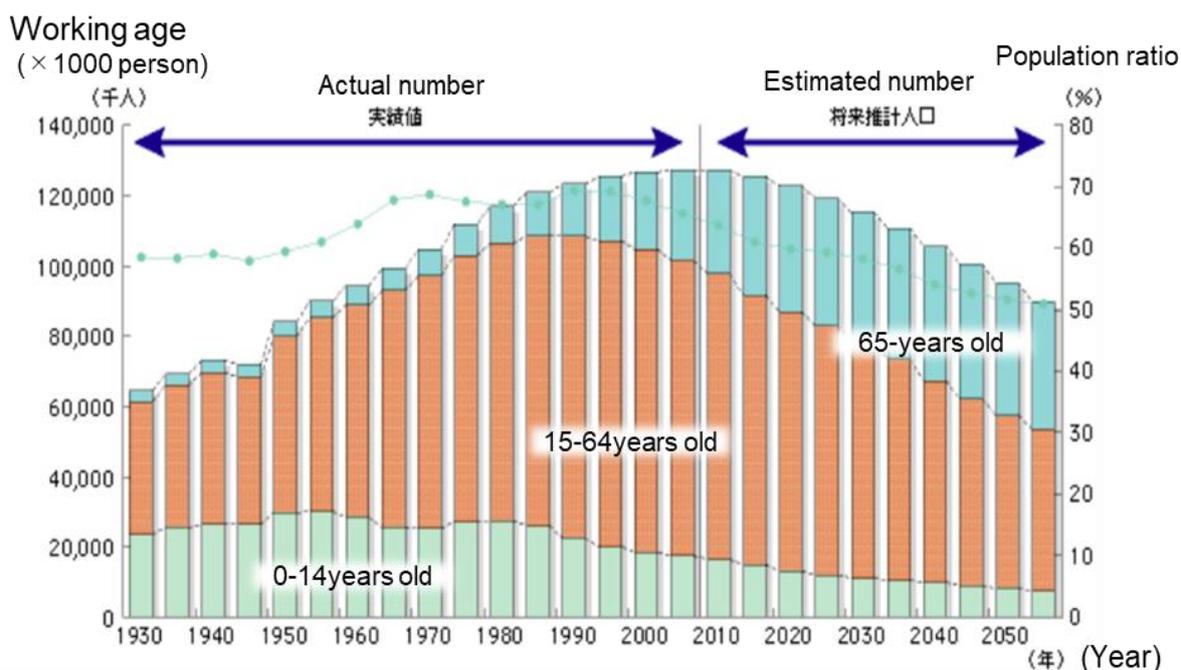
高齢化とあわせて、健康寿命も延びてきている。主要7か国の平均寿命が100歳を超えてくることを示している。長く健康に働き続けられることや自立したマルチステージ時代[2]への対応も重要な課題となり、関心が高まってきている。モノづくりの世界では個人の能力を踏まえた人作業の付加価値向上がより大きな意味を持つことが推察される。



First year of Reiwa White Paper on Aging Society, created based on datum from the Cabinet Office

Fig.1-1 Trends and forecasts of over-60s in Japan and other countries

日本の生産人口(15歳～64歳)に着眼すると、図1-2に示すように2060年には生産年齢人口半減が予測され、深刻な労働者不足と消費者活動の縮小が指摘されている[3]。これまではあまり注目がむけてこられなかった65歳以上の高齢者の方々に今まで培ってきたスキルや経験を積極的に活かし生産活動へ参加いただけるように工学分野からもしくみやツールの提供と整備が期待されている。



Quoted from following website and added explanation in English;
https://unit.aist.go.jp/icps/hcmi/document/introduction_202007.pdf

Fig.1-2 Prediction of decreasing working age population in Japan

モノづくり分野での実情として、生産年齢人口減少に対応して再雇用者、女性、障がいをお持ちの方がモノづくり分野へ参画いただいている。自動車製造業での取り組み[4]を整理した事例を図1-3示す。今後もこのような状況の中で、多様な人財が増える傾向にあると考えられる。しかしながら、その数も少子高齢化の状況を考えると長期的には減少に転じることが予想される。

一方で、多様な人財の活用する場合の問題として、作業能力の中央値の低下、ばらつきが大きくなることが予想され、能力の補完(半端工数の対応)などへの対応が必要となる。全ての労働者の能力を最大限に引き出し、人作業の付加価値向上といった中長期的な視野に立った、本質的な対応がモノづくり分野では必要とされている。

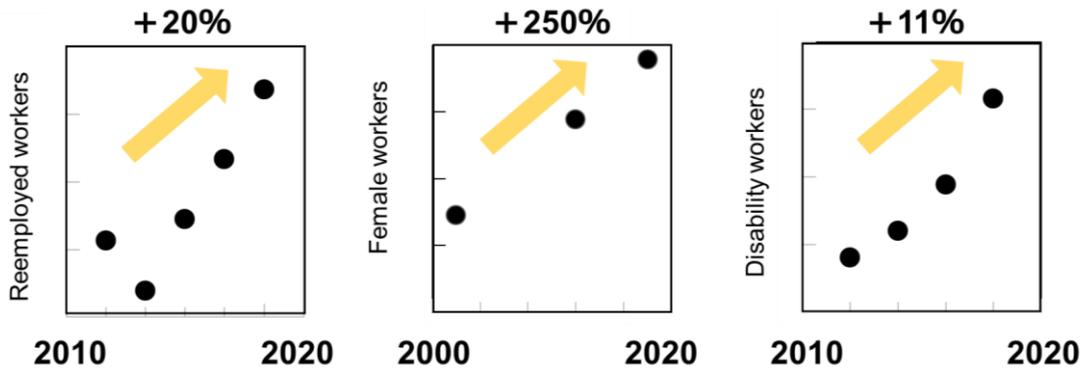
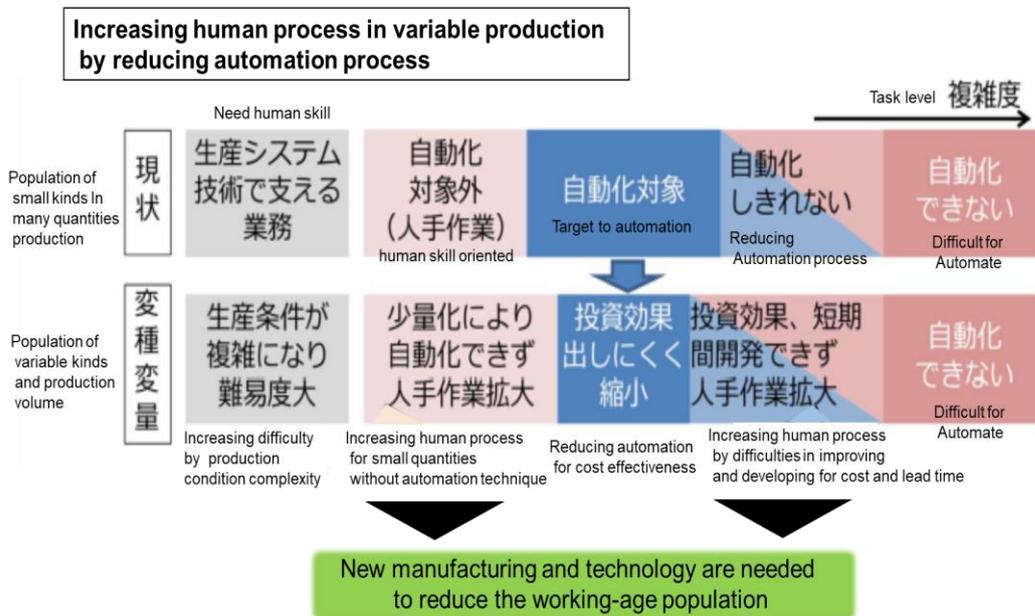


Fig.1-3 Human worker employment trends for diversity situations in manufacturing field as an automobile example of Toyota motor corp.

1. 1. 2 社会的背景～変種変量生産への対応

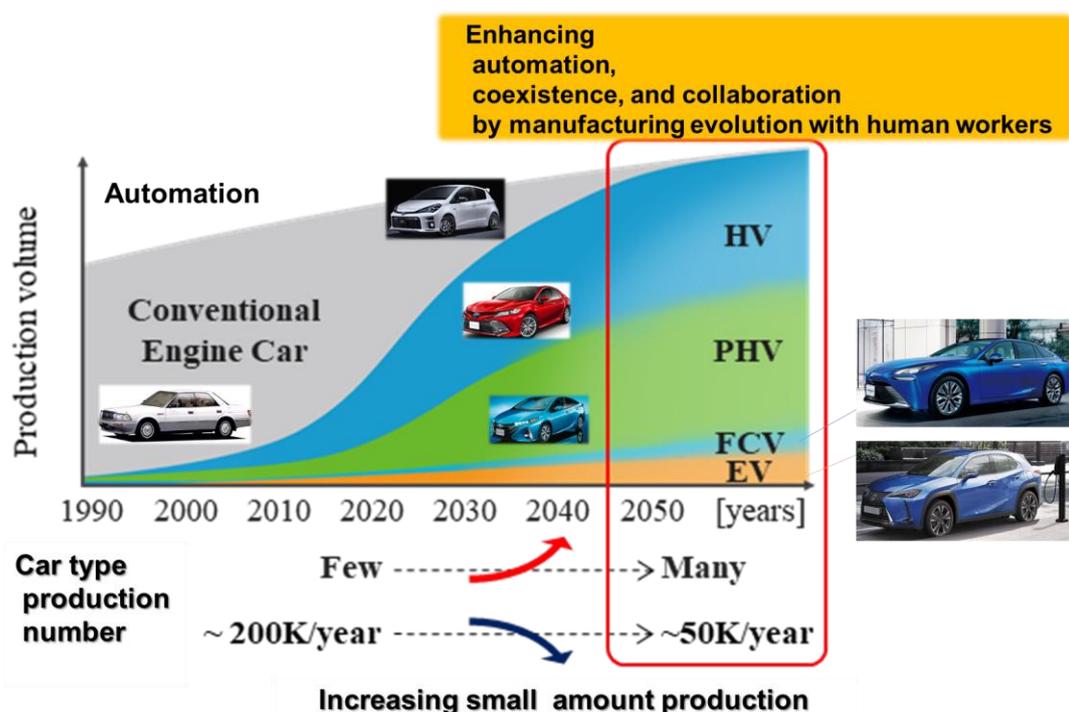
少子高齢化の社会背景を前節で述べたが、リーマンショック後の社会情勢は価値観の多様化が一層加速した。現地生産の増加もあり日本のモノづくりの変種変量、変種少量への早急な対応が必要となった。モノづくりのなかでは価値観、市場ニーズの多様化への対応として生産システムに要求される汎用性、機能、性能のレベルが近年際立って上がってきている。図1-4に示すように、従来の種類数、生産台数では自動化が成立できたものが、人手に頼らざるを得ないことが指摘されている[3]。この点においても生産人口減少のための新しいモノづくりにむけた仕組みやツールの整備が必要と考えられる。



Quoted from following website and added explanation in English;
https://unit.aist.go.jp/icps/hcmi/document/introduction_202007.pdf

Fig.1-4 New manufacturing and technology technical applying for variable kinds and volume production

図1-5に示すように、自動車製造業の業界においても、この傾向は同じで1990年代は1つのラインで年間20万台程度の生産量が確保できていた。パワーユニットの種類については、ほぼコンベンショナルエンジンのみであったため、自動化による生産性向上の対応が有効な手段であった。今後は年間5万台以下の生産量の車種が増加することが予想されている。パワーユニットの種類に関してはHVやPHVだけでなく、FCVやEVといった新たなユニットも加わり[5]人と機械が協調したモノづくり、自動化の進化・深化が必要であることが指摘されている[6]。



Quoted from following website and added explanation in English;
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/28416855.html>

Fig.1-5 New production target and trend for many power unit kinds in decreasing production volume as an example of Toyota motor Corp.

1.2 研究の位置づけ

1.2.1 社会的及び学術的意義

このような社会的な状況を踏まえて、日本の産業界、特にモノづくり分野で必要な社会的意義について整理をする。少子高齢化がグローバルで先行、親展することに対しては人作業の付加価値向上、社会ニーズの多様化に対しては、人と協調したモノづくり、特に人を中

心にとらえてた自動化の進化・深化が着眼点になると考える。図1-6に示すように、これらの着眼点に対する学術的なロードマップとして、人とロボットが物理的に互いの意思を持って助け合うことの重要性を提唱し、実現に向けたアプローチを行う。

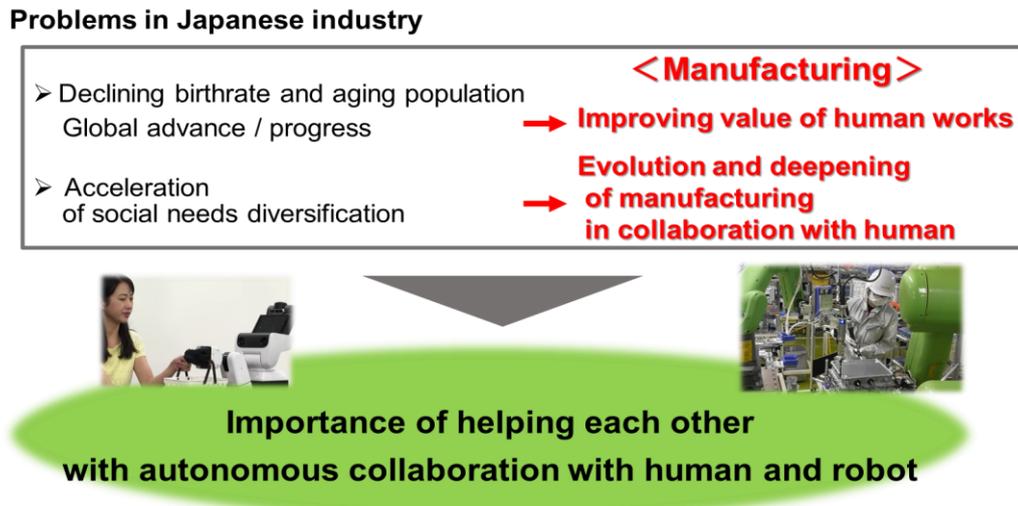


Fig.1-6 Robotics approaches with autonomous collaboration with human and robot

このような社会的な要請に対して、図1-7に示すロボティクス分野では介護、福祉といった領域ではサービスロボットのアプローチとして、モノづくり現場では産業用ロボットのアプローチとしてそれぞれ取り組まれてきている。今後はサービスロボットと産業用ロボットとの連携がより重要な位置づけとなることが予想される。

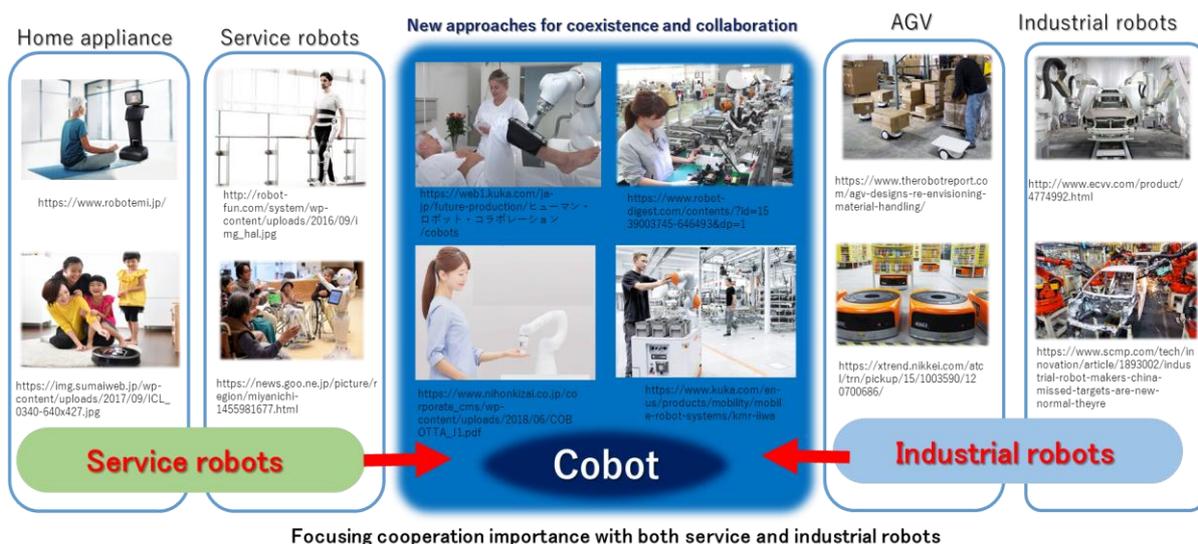


Fig.1-7 Cooperation with service and industrial robotics in Cobot application

人への直接的支援、物理的な協調する取り組みは技術進歩によって各領域の重なりが年々増えており、研究・開発及び、産官学での連携の重要性が増していると考えている。本論文では、モノづくり現場で産業用ロボットのアプローチとして、この重なり部である共存・協働化に絞ってその有効性を主張し、考察を行う。

本論文では安全評価とその妥当性確認をしたうえで人と安全に共存・協働化できると判断したものを協働ロボット(Cobot)と定義し、以下議論を進める。

1.2.2 モノづくり分野での研究意義

筆者が担っているモノづくり現場のアプローチを実行するにあたり、その活動要件には安全、環境、品質といった必ず達成すべき要件、原価、リードタイムといった競争力に関わる要件が一般的に存在する。産業用ロボットを活用するシーンにおける要件も同じで、安全確保がまず大前提となる。

ロボットを活用した自動化設備の安全要件を満足するために、機械安全、機能安全のアプローチを実施する。図1-8に示すように、自動化設備の安全確保として柵で囲うことで隔離による安全アプローチを行い、人とロボットの作業を分離し、自動化することで安全性と生産性の両立を図ってきた。安全に関わる構成機器に関しては故障モード分析に基づくフェールセーフ設計を行い、安全確認型の制御を導入している。またその制御の信頼性レベルも制御カテゴリを適切に選定して安全確保を実施している。

安全柵で空間的な作業領域を分離し、十分な安全対策をした場合でも、生産現場では残された安全に関わる問題があり、人で運用、管理して対応している。その代表的な作業が人とロボットが近接化するロボットのティーチング作業であった。

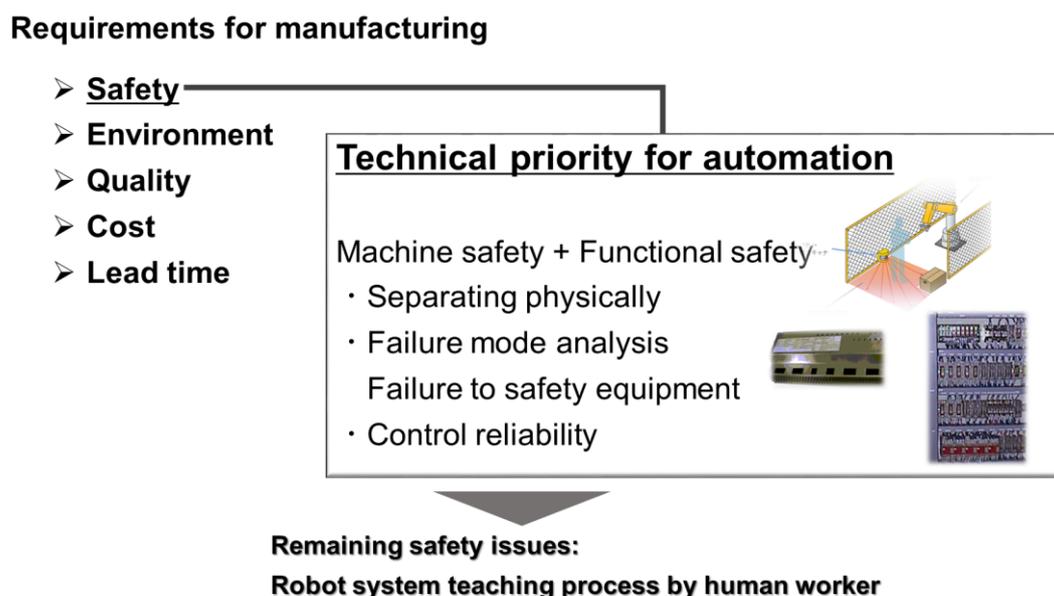


Fig.1-8 Machine and functional safety requirements for industrial robot system in manufacturing field

ティーチング作業時の残留リスクとして、ヒューマンエラーの要因で教示者からみるとロボットが意図しない動きと認識されるケースが想定される。このため人は容易にロボットの動きを避ける、または逃げられるようにティーチング時のロボット速度を 250mm/s以下に規定している。また、人が条件反射的にロボットを停止できるように 3 ポジションのデッドマンスイッチをティーチペンダントに装備されることが規定されている[7]。

筆者らの取り組みとして、図 1-9に示すように、ロボット故障に対する信頼性を確保の観点でハード面では安全制御回路の高信頼性化(カテゴリ4)、ティーチング作業者の命綱となるデッドマンスイッチの3ポジション化、またロボットシステムの安全面の要求[8]に対しては動作領域の高信頼性監視技術でリスク低減を実施し安全性を確保してきた[9]。運営面ではティーチング作業時に第三者の監視人を設定するなどの仕組みを整備してきた。自動化を進める中で、人が直接的、物理的にロボットを接触する可能性が高いティーチング作業時の安全性確保に取り組んできた。

これらのプロセスの中で強く感じてきたことは、今後の社会状況を踏まえて、より本質的な安全性確保を進める必要性である。人とロボットが助け合い高い生産性を確保できるモノづくりを目指したいという想いが研究の動機となっている。安全な人とロボットの共存・協働研究および産業応用開発が本論文のテーマとなっている。

Securing safety in robot teaching process

Unintended motion

- ✓ Avoidable restricted speed
- ✓ Stop ability by human reflection

Unpredictable danger

- ✓ Additional member for safety monitoring

Countermeasure for Failures

- ✓ Mechanical brake check before teaching
- ✓ Management for periodical inspection



Functional Safety for teach pendant

Robot teaching process



Manual mode confirmation process



Start for research and development
for achieving autonomous human robot coexistence and collaboration since 1990

Fig.1-9 Technical activities for keeping safety in industrial robot teaching process

産業用ロボットを導入するにあたり、使用者は従業員となるので、雇用者は確実な安全性の確保が前提となり、法規でも厳格に規定されている。

ロボットとの共存・協働作業を想定した場合に、ロボットとツール、および治具やワークとの接触、および挟まれなど、人が挟まれるリスクの大きさは対象部位の柔らかさ、接触速度などが支配的な因子として考えられる。

対象物が比較的柔らかいものを扱う産業として三品業界などでは挟まれ時のリスクが比較的小さく、協働ロボットの適用が簡便にできるケースが多い。しかしながら、図1-10に示すように、自動車産業で扱う金属加工部品などは硬いものや鋭利なものが多くあり、ツール、ワーク、治具との挟まれやせん断の傷害リスクが存在する。これらの状況に対して、協働ロボットは多くの市販品がリリースされたものの接触時の安全確保のしくみや手段が見いだせない状況であった。特に対象物が硬いものや鋭利なものに対応した安全確保の技術が整備されていない状況にあった。産業用途の領域においても生産システム全体を構成するうえで、これらのリスクが多く残り、確実な安全性の確保が困難であることが問題であった。

Characteristics of automobile parts: Many are hard or sharp



Fig.1-10 Typical industrial safety requirements for Cobot application in automobile manufacturing field

少子高齢化の進展への対応、モノづくりとして、産業用ロボットをより踏み込んだ領域で活用という、より積極的に人とロボットが意思をもって自律的に助けあい、物理的な支援を行うことができる仕組みをつくることを研究課題に筆者らは1990年頃から着手してきた。

本研究の起点に産業用ロボット領域で共存・協働ロボティクス技術の実用化できる技術レベルに到達し、仕組みの整備も行われた。人と産業用ロボットの共存・協働化の拡大に向けた黎明期であると考えられる[10]。

次節以降では、本研究に関わる先行研究のレビューを安全とモノづくりのあり方について述べる。先行研究のレビュー結果を踏まえて本論文の研究課題とその取り組んだテーマとアプローチについて整理し本論文の構成について述べる。

1.3 人とロボットの共存・協働

1.3.1 人とロボットの共存・協働～安全に関わる関連研究

協働化における安全性確保の考え方として、ロボットが人にダメージを与えないことを大前提とする。人へのダメージは精神的、肉体的ダメージが想定される。精神的ダメージは多くの研究例が紹介され活発に議論されている。速度、加速度が人の恐怖心へ及ぼす影響[11][12][13]、また最近では人が良い感情をいだくサイバネティックモーションに関する研究が紹介されている[14]。

しかしながら、1990年の本研究開始当初は人とロボットの共存・協働作業に適用できる肉体的なダメージに関する具体的な研究が見いだせない状況であった。図1-11は、共存・協働作業ができるしくみのために、心理的なダメージを与えないための速度に関する規範をあらかじめ与え、また、物理的なダメージを回避するための規範が見当たらないため、これを必要とする標準の在り方を示している。

筆者らは1993年から人とロボットの共存に向けた痛覚耐性値の解明を行い、その結果を踏まえた安全基準の提案を行った[15]。本論文では、この研究内容を2章に記述する。

Cobot safety criteria

Safety requirement: No damage by robot for human operators

1. Mental damage (Robot speed, acceleration)
→ $V \leq 0.6 \text{ m/s}$, $a \leq 4.9 \text{ m/s}^2$ Set condition

2. Physical damage (Robot contact force)
→ No technical research for coexistence safety

**Humans and robots can interact safely,
Research and development for autonomous coexistence and collaboration**

Fig.1-11 Cobot safety criteria and necessity of establishing physical safety standards

2章で記述する提案に対して、多くの国内外の研究機関で追加の人間工学実験結果[16][17]が加わり2016年にISO/TS 15066として制定されている[18]。人と産業用ロボットの共存・協働に関わる安全ガイドラインは整備されたが、その安全性検証(Verification)と妥当性確認(Validation)は2020年の現在においても、これから事例を積み重ねて整備されていく段階にある。サービスロボットの領域でも同じ流れであることが指摘されている[19][20]。

特に、妥当性確認方法は客観的証拠を提示することによって、特定の意図された用途又は適用に関する要求事項が満たされていることを示す必要がある。適用ごとに妥当性確認方法を構築するため、その方法が確立できていないことが現在の問題である。

そこで本論文では実際の生産ラインへの適用し、共存・協働作業でのリスクアセスメントとその結果に基づくリスク低減アプローチの実施効果、安全性に関する妥当性確認方法を提示する。さらに安全性と生産性を両立する共存・協働作業の計画と実証を行う。評価指標としては身体の安全性、身体的負担感(エルゴノミクス)と気遣い作業等の負担感の低減、さらに生産性の指標として作業プロセス数に着眼し、その効果を第4章に記述する。

1.3.2 人とロボットの共存・協働～モノづくりのあり方の関連研究

今後のモノづくり分野において少子高齢化や、お客様ニーズの多様化があげられる。少子高齢化については、各国の高齢化率の推移からわかるように、日本は突出して高齢化が先行かつ急激に進行しており、各国がこれに続く構図となっている。我々が先陣をきってこの問題解決に取り組む必要があると認識している。少子高齢化の影響により労働者の多様化が拡大し、製造現場では作業能力の低下および人による作業能力ばらつき拡大といった問題がある。この対応として、誰もが働きやすく、生産性を改善するためには、負担感がある作業の低減が課題と考えている。

自動車製造におけるモノづくりにおいて、お客様ニーズの多様化については、従来はエンジン車のみであったが、近年はハイブリッド(HV)車、燃料電池車など幅広い車が増加傾向であり、多量少品種生産から少量多品種生産への移行が重要となる。このため、汎用化、移設・再配置が簡単な設備、人作業のプロセス低減をセットで行い、柔軟な工程づくりをする必要がある。そこで、ロボットが人に寄り添って作業ができる新しいモノづくりに着目した。従来の自動化に加え、共存・協働化、共進化[21]といった人と産業用ロボットの関わり方を図1-12に示す。

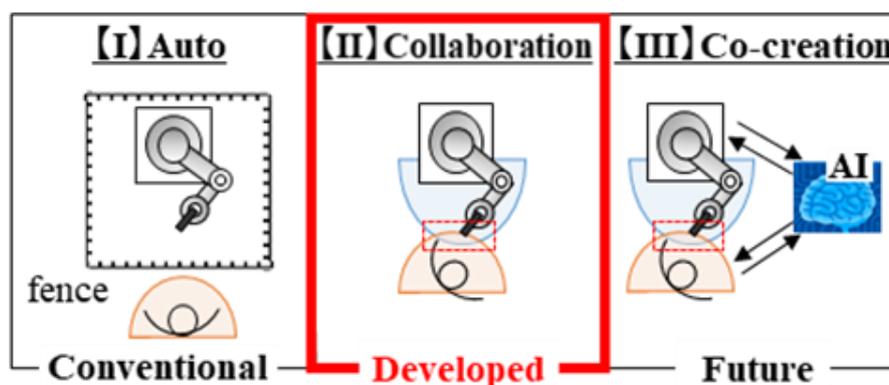


Fig.1-12 Research and development target for industrial robot applications

従来、人とロボットを隔離した【Ⅰ】自動化を中心に生産性を確保してきた。【Ⅱ】共存・協働では安全柵がなく、人とロボットが同一空間で作業できる。このため、従来生産性の観点より自動化できなかった手動と自動を頻繁に切り替える工程も自動化でき、作業者の負担軽減および作業プロセス低減にも寄与できる。この共存・協働作業の実現には作業中に人とロボットが接触しても安全に作業を継続できる技術開発と人とロボットの適切な作業分担と工程計画が必要となる。さらに【Ⅲ】共進では、ロボットが作業者の能力を踏まえた作業分担を提案し、人とロボットが同僚のようにお互いを高めあえる関係が築ける可能性を有している。本章では【Ⅱ】の領域における実用化研究と開発に着眼して取り組むこととする。

自動車製造の領域ではモノづくりの現場においても労働力の低下を踏まえると労働集約型の限界があり、人作業の付加価値向上を目指して物理的な作業の支援・協調の研究に着眼して取り組まれている[22][23]。

しかしながら、現状のモノづくりはシーケンシャルコラボレーションの段階であり[24]、接触時の安全確保をしたうえで協調作業を活かした生産計画など有効な生産性実証などの事例は近年関心が高まっている。

ロボットを活用した自動化と人作業とに分けて進めてきたモノづくりだけでなく、人を中心として捉えたうえで、人とロボットの協調を進めること、特に共存・協働の概念を取り込み、より生産性の高いモノづくりが今後より重要性が高まるテーマと考えている。

人とロボットの安全なインタラクションの考え方として Post-collision safety と Pre-collision safety の2つの安全戦略として分類されている[25]。また安全規格の観点からロボットが人と接触した場合に人が痛みを感じるまでを安全規範とした取り組みと非接触状態で安全性を確保するために速度と回避制御の取り組みに分類される[26]。

モノづくり分野においてヒューマンエラーを想定した場合、人とロボットが意図しない接触も想定される。また、今後のモノづくり以外への展開、サービスロボティクスとの中長期連携を視野に本研究では人と触れ合うことを前提とするモノづくりに絞って考察を行う。

そこで本論文では協働(協調)領域まで含めた接触を想定した安全性確保の問題に取り組み3章で記述する。また、自動、共存・協働の特長を活かした工程計画を構築し安全性と生産性の両立について検証を行うことを4章で記述する。

人とロボットの動きを観測でき、これらの作業内容を踏まえた安全性と生産性の両立を評価関数として学習することができれば、人の作業意図の理解、ロボットへの学習が加速され、より高いレベルのモノづくりへつなげることが期待できる[21]。従って、共存・協働化の実用化は今後のモノづくりの革新に向けた入口であり、かつ大きなマイルストーンと考えている。

人とロボットシステムが協調して新たな生産性を切り拓く時代に向けて、共存・協働作業の確実なリスクアセスメントと安全性確保をすること[27]、また、これに対応したロボット及びその周辺機器、システム化、知能化、それらを統合する技術開発が活性化されることが強く期待されている。安全技術の領域ではロボットがより活用できるように論理的安全から確率

的安全へ規格が改定[28]され、人と機械系の協調安全のしくみ[29][30]やアプリケーションが提案されている[31]。

本論文では、人とロボットとの協調を実現するための第一歩であり、かつ最初に通らねばならない安全性の検証と確認を進める。そのうえで人と共存・協働するロボットシステムの実証をすることを主題とする。そのための技術課題を次節にて整理する。

1.4 共存・協働のための研究課題とアプローチ

1.4.1 本論文の問いと学術的研究課題

本研究における主たる研究課題(以下、Main-Research Question: M-RQ)を筆者が担当する産業用ロボットの活用のモノづくり分野に着眼し、人とロボットは安全にふれあい、共存・協働作業で助け合うことはできるのか?と設定する。このM-RQに対する学術的研究課題として、自律性を持って安全性を確保し共存・協働作業ができるのか?とする。

M-RQ を構成する従たる研究課題(以下、Sub-Research Question: S-RQ)として、本論文では3つのS-RQを設定し、議論を進める。以上を整理したものを表1-1に示す。本論文で設定した3つのS-RQは2から4章にてそれぞれの検証結果とともに記述する。なお、5章にて今後の展望とまとめ、6章にて結言を行う。

Table.1-1 General and academic research question arranged by main and sub research question with description chapter

Described in	General Research question	Academic research question
M-RQ Chapter1	How does achieving safety human and robot coexistence and collaboration in manufacturing?	How does autonomous safety operations for human and robot coexistence and collaboration?
S-RQ Chapter2	What safety physical interaction for human and robot coexistence and collaboration in manufacturing?	How do determining the level of physical acceptance and the sensation in which it can be determined?
	What extent is contact level allowed in manufacturing?	How to ensure physical safety by describing human sensation as an alert index?
S-RQ Chapter3	How does autonomous helping each other in allowed contact level in manufacturing?	How to prove autonomous safety contact detection and stop capabilities with human sensation as an alert index?
S-RQ Chapter4	How to show developed tool and/or system effectiveness and contribution in actual manufacturing?	How to demonstrate that both safety and mutual help (productivity) can be achieved in actual production line?

第一の S-RQ としてモノづくりにおいて人とロボットの作業の中で安全なふれあいとは何か？そしてそのふれあいはどこまで許されるのか？との問いに設定する。学術的研究課題として、物理的な人への受容レベルとその判断が可能な感覚を決定し、身体的安全性を確保するために人の感じる感覚をアラート指標として記述できることを主張したい。

第二の S-RQ としてモノづくりにおいて、その許されたふれあいの範囲内で自律性を持って作業を助け合うことができるか？との問いを設定する。学術的研究課題として、その感覚を取り込んだロボットシステムが選定したアラート指標に従い、自律性を持って人との安全な接触検出と停止が可能であることを示したい。

自律性のレベルについてはタスクの難しさの観点で、物理的な人への受容レベルをロボットが理解し接触規範で停止制御を行う。人間とのインタラクションのレベルの観点では接触規範の協働作業のなかでロボットと直接的にふれあう作業を想定する。環境の複雑さの観点では一般的なモノづくり現場の生産ラインを想定し、特定の作業者との定常作業を対象とする。

第三の S-RQ としてモノづくりにおいて実現できたしくみや手段が実際の社会に定着でき、有効性を示すことができるのか？という問いを設定する。学術的研究課題として実際の生産ラインで安全性と助け合い(生産性)が両立できることを実証できることを検討することとする。

1.4.2 本論文の構成

本論文では1990年頃から実施された基礎研究と2016年から2020年までの実用化・展開の取り組みを学術的に整理し、今後の人とロボットの安全な助け合いの有効性を示す。また、今後の展望についても議論する。本論文の構成は以下のとおりである。

第1章では研究の社会的背景と動機を述べる。ここでは先行研究の状況を踏まえて M-RQ と S-RQ の設定を行う。

第2章では第一の S-RQ に対して人とロボット共存・協働のための安全基準構築について論じる。研究テーマとアプローチとして、①知覚特性を踏まえた物理的安全受容度の検証⇒安全に触れ合うための痛覚耐性の明確化、②人体への過渡的・準静的な痛覚耐性値の記述を行う。学術成果は研究業績目録の業績(1)に対応する。

第3章では第二の S-RQ に対して安全基準を踏まえた共存・協働ロボットシステムについて論じる。研究テーマとアプローチとして、①人とロボットの接触問題の明確化～衝撃力と挟圧力緩和、②人とロボットの機械的インピーダンスマッチング問題として安全な接触と停止機能の検証につて記述する。学術成果は研究業績目録の業績(2)(3)に対応する。さらに、③人の耐性感覚を取り込んだ安全なロボットシステムの構築 についても論じる。学術成果は研究業績目録の業績(4)(5)に対応する。

第4章では第三の S-RQ に対して安全な人との共存・協働ロボットシステムの実生産ラインへの適用について記述する。研究テーマとアプローチとして①社会定着のための安全検証と評価のしくみ構築と整備、②モノづくりにおける自動、共存・協働の特長を活かした人

とロボットの作業分担計画、③実ラインでの安全性・生産性両立の実証について記述する。学術成果は研究業績目録の業績(6)に対応する。

第5章では、以上の M-RQ,S-RQ を追求した成果とその評価及び新たな発見について整理を行う。2章から4章の取り組みを踏まえて各 S-RQ に対する今後の研究及び開発の方向性、今後の展望について述べる。

第6章では本論文で設定した研究課題 M-RQ,S-RQ に対する結果をまとめる。

以上の、構成と記述フローをまとめたものを図1-13に示す。

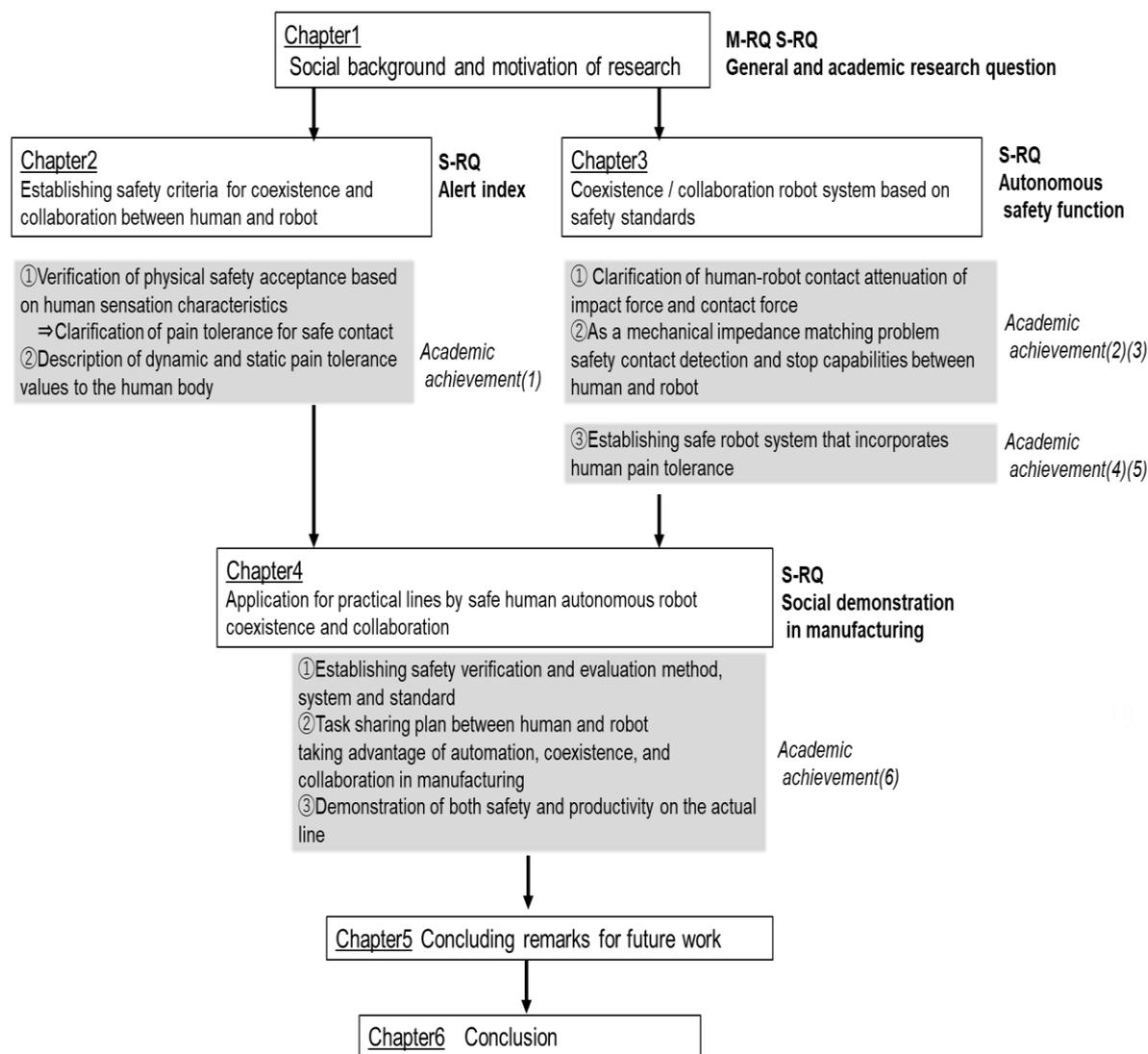


Fig.1-13 Structure and description flow in this doctoral dissertation

第2章 人とロボット共存・協働のための安全基準構築

2.1 安全基準としての人の痛覚耐性

2.1.1 共存・協働のための予防安全

産業用ロボットは人と空間的に隔離することで自動化における安全を確保してきた[32]。ロボットの安全に関する研究は1990年代まではロボットの信頼性、保全者の安全確保、及び事故解析に関する研究が中心であった[33][34]。

人と同じ環境で共存・協働し、人とロボットが互いに得意な作業を分担する生産システム[35][36]、高齢者や障害者に対するサービスロボット、さらには家庭内で家事・補助を実行するホームロボットが必要になると予測 [37] されていた。現在はまさにその黎明期から実用期に移行中であると考えている。

このような共存・協働ロボット実現のためマン・マシンインターフェイスに関する研究などが紹介されており[38]、特に共存・協働時の安全の確保が重要な課題となることが指摘されている[39]。そこで本論文では共存・協働化において安全性の確保が大前提となるため、安全の定義をロボットが人にダメージを与えないこととする。

人へのダメージは精神的、肉体的ダメージが想定される。精神的ダメージは多くの研究例が紹介され活発に議論されている。ロボットが接近する速度、加速度が人の恐怖心へ及ぼす影響を解析した研究[11][12] [13]、最近では人が良い感情をいただくサイバネティックモーションに関する研究が紹介されている[14]。

自動車の安全技術を例に考察した場合、未然に事故を防ぐための予防安全と事故による人の傷害を最小限に抑えようとする衝突安全に分類できる[40]。安全の原理として安全確認型の技術規範を示し、安全情報伝達のユニタリ性による機械系での増幅過程を考察[41]が報告されている。ここで、共存・協働ロボットにおいても前者の予防安全が優先されるが、頻繁な人とロボット間の干渉を想定した共存・協働状態において人側の安全空間を定義し、予防安全することは困難であることが予測される。

ロボットによる周囲状況との干渉チェックを対象とした外界センサの現状の技術レベルを踏まえると、人がやむを得ずロボットと接触する状況を考慮する必要がある。しかしながら、1990年の研究開始当初は人とロボットの共存・協働作業に適用できる肉体的なダメージに関する具体的な研究が見いだせない状況であった。

本論文では人とロボットは自律性を持って安全にふれあい、共存・協働作業ができるしくみの研究と開発を主題とする。人とロボットの共存・協働に向けた痛覚耐性値の解明を行い人とロボットの安全基準の提案を行うこととする。

2. 1. 2 安全空間としての痛覚

安全の分野における機械刺激に対する人の耐性値の研究例として、高速(たとえば35mile/h)で運転される自動車の衝突時の乗員の生存限界等の研究が紹介されている[42][43]。これらの研究は衝突安全に注目し、人の耐性値を中等傷レベルに設定している。したがって、そのまま共存・協働のための安全指標には適用できない。これに対して、予防安全の立場から人の耐性値を評価する試みはほとんどない状況である[44]。

人とロボットの安全性を想定した場合は、比較的低速な動作制御や外界認識のためのセンサフィードバック等の有効性が見込まれ、人との接触が人側の傷害とならずに済む可能性がある[45]。安全と傷害事故の間に介在し、潜在的あるいは実質的に傷害と結びつく不快な感情的、情動的体験が痛みであるとの指摘がある[46]。痛みの神経回路網に着眼しロボットの意識設計についての提案がなされている[47]。

また、人の感覚受容の中で痛覚は特化されることなく、五感全てに共通して存在する。過度の刺激から身を守る耐性ができている。自己保存の原始的な感情としての痛覚を基点として取り扱うことの提案[48]がある。

しかしながら、多くの痛覚に関する話題がおきているものの、具体的な研究事例は見いだせない状況であった。そこで、この痛みが感じられるまでを「安全を保証する空間の及ぶ範囲」と定義し、人とロボット間の干渉をチェックする動的なバリアとして機能させることで、このバリアが共存・協働ロボットの予防安全のための設計基準となる可能性があることを検討する。

また、痛覚の形成に関与する侵害受容器の分布は体性感覚受容器の中で最も密であり[49]、痛覚閾値は個人差が少なく安定した感覚で[50]、順応もほとんどない[51][52]という点に着眼した。

本論文では、痛覚を身体的な傷害に対して可逆性の高い最大感覚のバリアとして利用できる可能性を検討する。人の痛覚耐性値とその記述方法について準静的、過渡的な入力に場合分けして行う。被験者を用いた人間工学に基づく実験から痛覚耐性値を解明し、安全な共存・協働ロボットの設計指標を提供することを本章の目的とする。

2. 2 痛覚耐性の実験方法

2. 2. 1 痛覚レベルの耐性値

痛覚レベルの反応計測対象は、痛覚が発生する閾値と発生後の強さ、そして痛覚に対する我慢限界である耐性が考えられる[50]。安全空間の限界は、これらの中で人体各部位の痛覚の耐性を求めることに対応する。

そこで筆者らは、被験者の代表的な身体部位に機械的刺激量を加え、耐えられる限界を痛覚耐性値とみなすアプローチを提案し、痛覚耐性値の測定例を報告した[53]。本研究でも同じ方法を採用し、被験者の代表的な部位に機械的刺激量を徐々に増加させ、被験者が痛みの主観的限界を感じた場合の機械的刺激量を耐性値とする方法を用いた。

一般的な人とロボットの接触時との応答波形を図2-1に示す。力を縦軸に時間を横軸に取った場合の被験者への機械的刺激として2つの状態に整理できる。一つは過渡的接触状態であり、もうひとつは準静的接触状態である。

それぞれの、許容値を求めるため、被験者への機械的刺激を準静的、過渡的な場合に分けて実験する。与える機械的刺激量としてそれぞれ挟圧力と衝撃力を採用した。

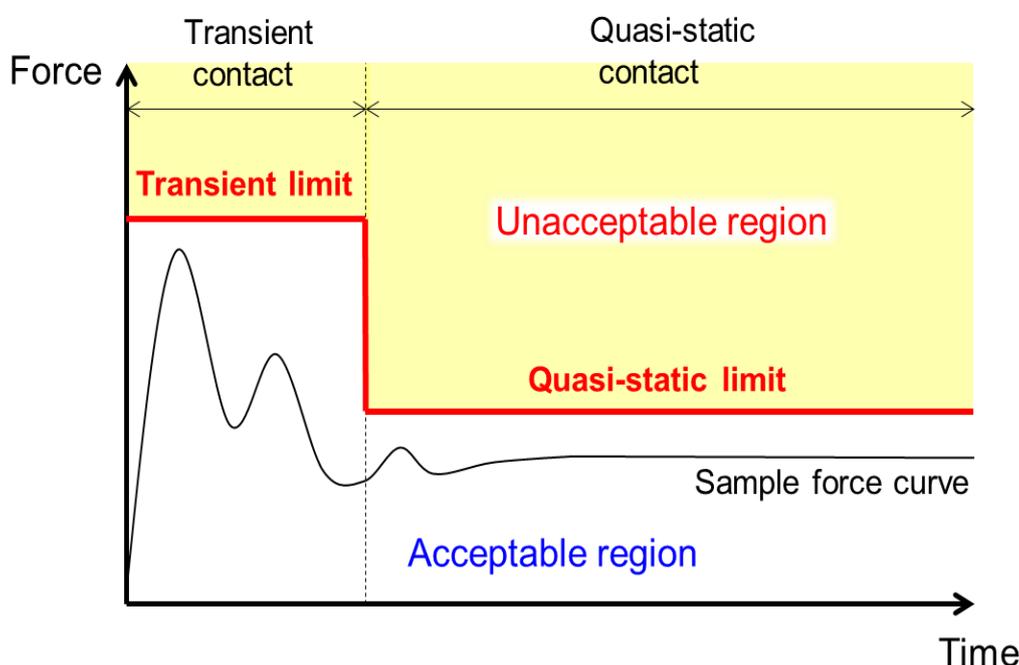


Fig.2-1 Graphical representation of acceptable and unacceptable forces or pressures for human and robot coexistence and collaboration

後述する2. 3. 2節では、力以外の耐性値記述方法を提案する。人の皮膚変形量、変形速度に着眼した記述方法を提案する。

2. 2. 2 痛覚耐性値解明のための実験方法検討

実験システムの構成を図2-2に示す。機械的刺激量を与えるためのアクチュエータとして空気圧シリンダを利用した。ピストンロッド先端にグローブを取り付け、同軸上にロードセルを設置した。与えた機械的刺激量である力 $F(t)$ とあわせてピストンロッドの変位 $\delta(t)$ をサンプリング時間 5ms で同時に測定した。また、速度 $V(t)$ は変位 $\delta(t)$ から求めた。

ここで、皮膚の粘弾性定数測定において接触面積 $\Phi 10$ mmの場合が最もバラツキが少ないことが実験的に示されていること[54]、そして人間とロボットの接触を想定していることから、接触プローブとして $\Phi 10$ mmの真鍮製円板を採用した。

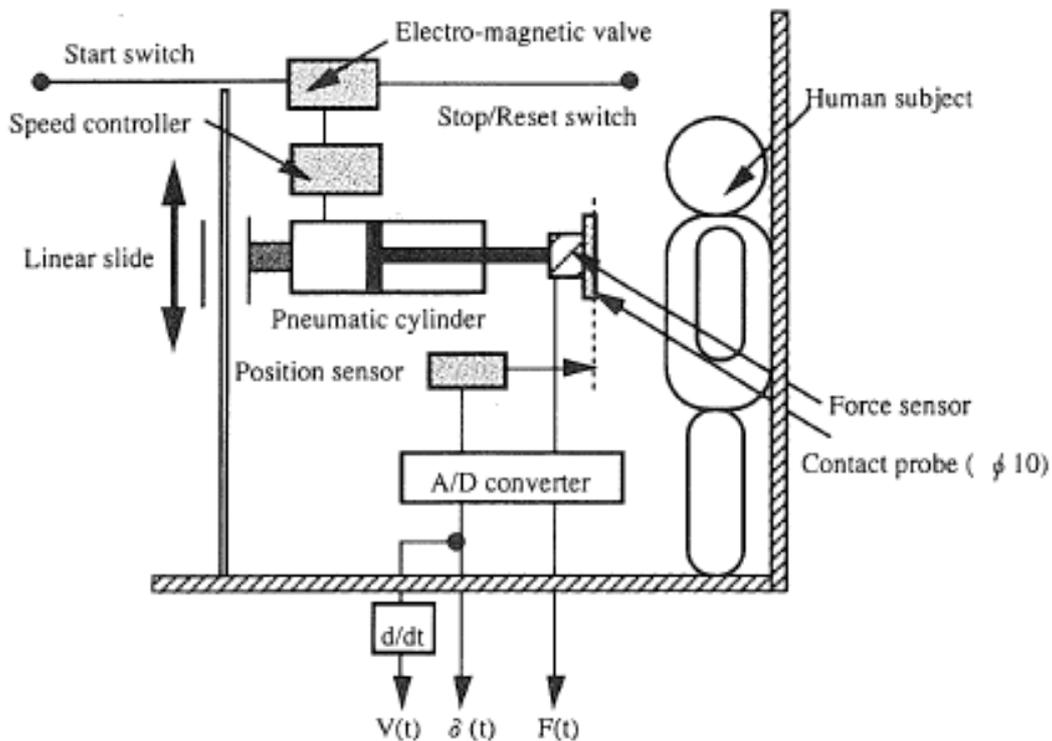


Fig.2-2 Arrangement of experimental equipment for human pain tolerance measurement

第3者がスタートスイッチを操作し、機械的的刺激量を徐々に増加させ、被験者が痛覚を感じると同時に停止スイッチを押すことで初期状態に復帰する実験システム構成とした。この実験システムの仕様を表2-1に示す。

Table.2-1 Specification of experimental equipment

Applied element	Specification
1.Pneumatic cylinder	Piston diameter $\phi 30$, Piston stroke 150mm
2.Supply pressure	$59\text{N}/\text{cm}^2$: Velocity control in exhaust site
3.Electro-magnetic valve	5 ports with reset control by a spring
4.Load cell	Capacity 490N, Compression type
5.Displacement sensor	Wire drive with analog output type (Range:2m)
6.A/D converter	12 bits with amplifier type,
7.Computer	PC9801 : Sampling time=5ms

被験者に対しては、衣服による測定誤差を避けるため、上半身はシャツ1枚の上に薄手の作業服、下半身は作業ズボンに統一した。

測定部位は、図2-3に示すロボットと人間が接触する可能性の高く、痛みを感じやすいと想定されるaからlの12部位を選定した。

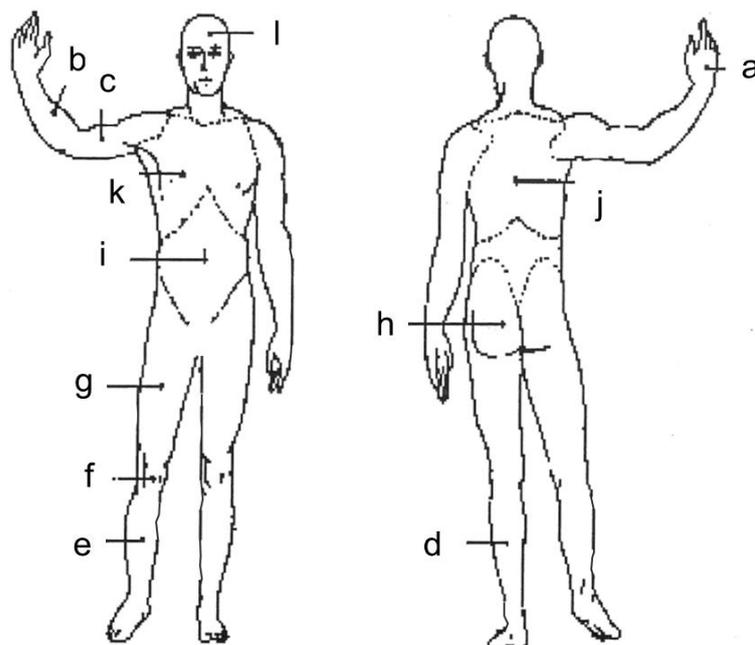


Fig.2-3 Measurement points for evaluating human pain tolerance for human and robot coexistence and collaboration

痛覚耐性においては、感情的な痛みの影響を受けやすく[50]、これを完全に排除することはできない。実験においては筋肉の緊張をさせないこと、痛覚の水準を保つこと、感情的な要因を排除するよう事前に被験者に指示した。

傷害の実質的手前の段階で生じる感覚として痛覚に着眼し、その感覚が感じられるまでを耐性限界とした。これを押しつけ力によって準静的と過渡的な入力に場合を分けて痛覚耐性値として表す。この人間工学実験方法を次節以降で述べる。

2. 2. 3 痛覚耐性値の測定～準静的な許容挾圧力

従来の研究状況として、準静的な力を刺激量として考え耐性値を測定した例が報告されている。一例として、自動ドア挟まれ防止装置に関して手指が圧せられた場合の痛覚耐性値評価が報告されている[44]。

ロボットの場合では、人がロボットと接触する部位は全身に及ぶが、これら全てを対象とした準静的な機械的刺激による痛覚耐性値の評価は、筆者らによる報告例[53]以外に見いだせない。

本研究では、挟圧力を非常にゆっくりと(130mm/s)加える過程で、各部位に痛覚が発生する時点の接触力を耐性値として求め、このときの力を耐性値として整理することにした。

挟圧力を各測定部位に適用した場合の力と位置の過渡現象を図2-4に示す。実験方法は第3者がアクチュエータをスタートさせ、耐えられる限界で被験者自らがリセットする構成とした。その耐性限界を準静的耐性値とした。

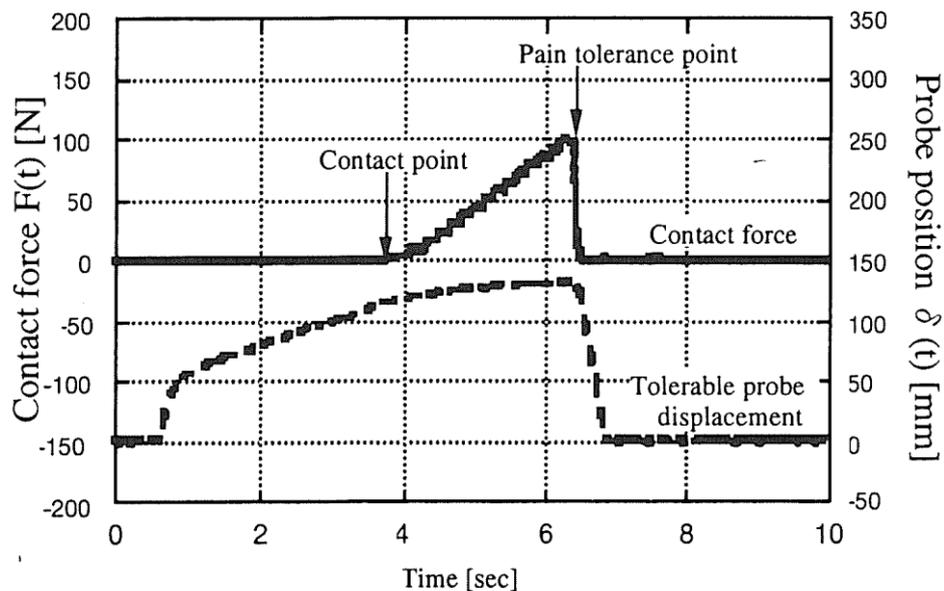


Fig.2-4 Transient characteristics of quasi-static human pain tolerance

10から50代の男女合計16名の被験者に対して準静的耐性値を測定し、各部位の耐性値の最小、最大、平均値、標準偏差に整理した結果を図2-5に示す。耐性値の最小値は13から46N、平均値は65から146N、最大値は133から245N、標準偏差は28から68Nであることが判明した。

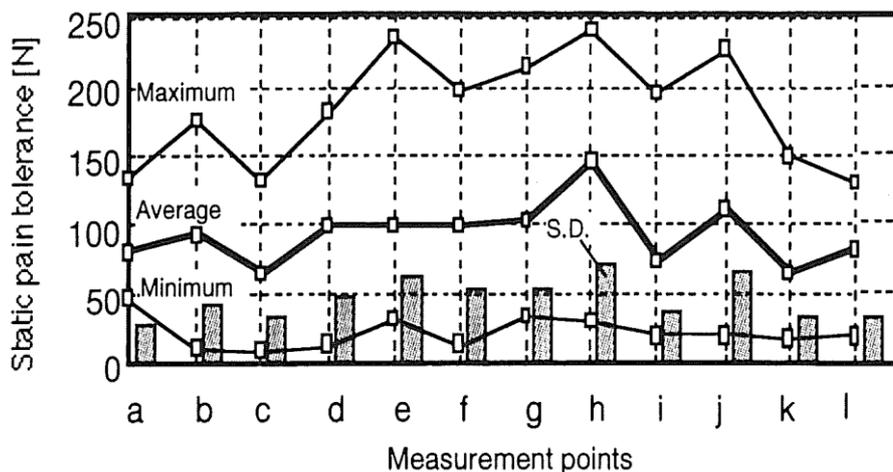


Fig.2-5 Experimental results of quasi-static human pain tolerance

2.2.4 痛覚耐性値の測定～過渡的な許容衝撃力

衝撃力の耐性値の研究例として、人体の中等傷の傷害レベルの発生限界の定量化を目的としたWayneの耐性値曲線[55]が有名である。この研究では頭部衝撃耐性曲線が報告されており、衝突時の加速度波形面積を持続時間で割った平均値(有効加速度)と衝撃持続時間 Δt が評価パラメータに用いられている。

衝撃力の与える方法を図2-6に示す。接近速度は人が精神的に恐怖心を感じさせない程度の0.35m/sに設定した。被験者への過渡的的刺激は自動的に1.0s毎に繰返し、その刺激を徐々に増加させる方法を採用した。

ここで、衝撃持続時間 Δt はプローブを含めたアクチュエータの機械的インピーダンスに依存するため、衝撃持続時間 Δt を0.1s以上では電磁弁で空気圧アクチュエータの流量を調整することで制御した。また、 Δt が0.05s以下の刺激を与えるためには生体側の機械的インピーダンスは制約されているため、プローブ側の機械的インピーダンスを増加させる必要がある。従って、エアシリンダを用いたシステムではその動作流体の圧縮性から Δt が0.05s以下の衝撃力を発生することができないため、ハンマーの運動エネルギーを利用した実験装置[42]を採用した。

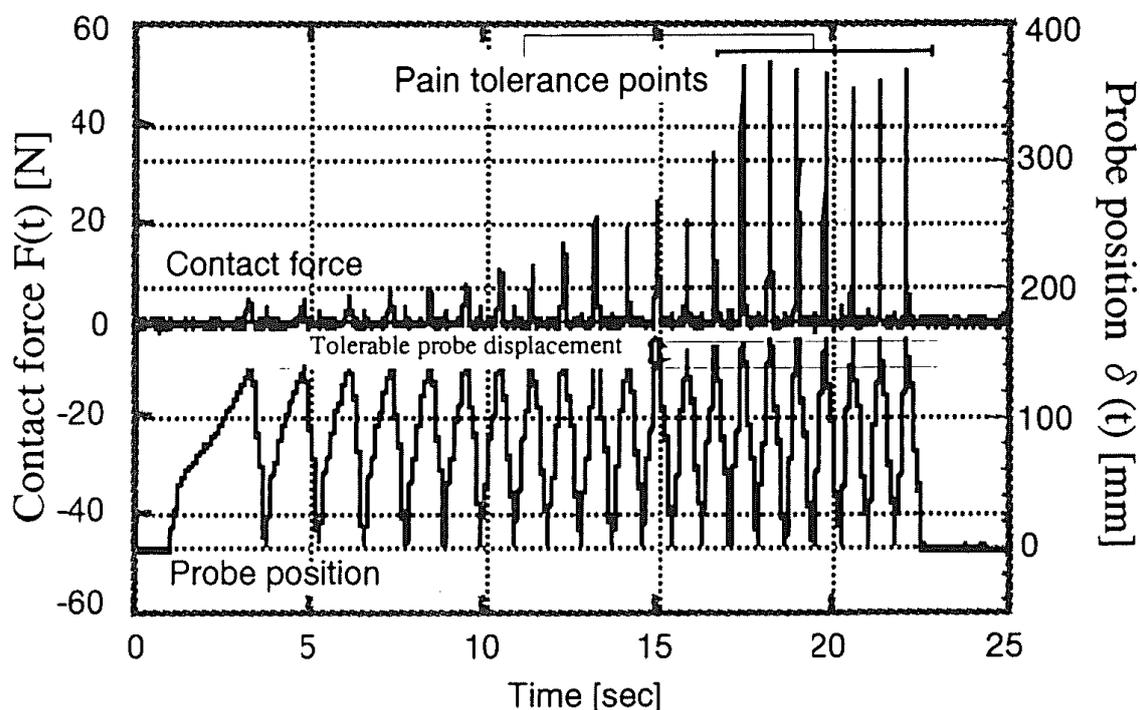


Fig.2-6 Procedure of measurement for transient human pain tolerance

図2-7は耐性値における衝撃力の波形例である。ここで、力 $F(t)$ が0.02s以上の間で正となる観測がされた場合の開始時刻を t_1 、力 $F(t)$ が0.02s以上の整定状態が観測された

場合の開始時刻を t_2 と定義した。その立ち上がり t_1 から立ち下がり t_2 までの衝撃持続時間 Δt と衝撃力の時間平均 F_{ave} の関係を調べた。

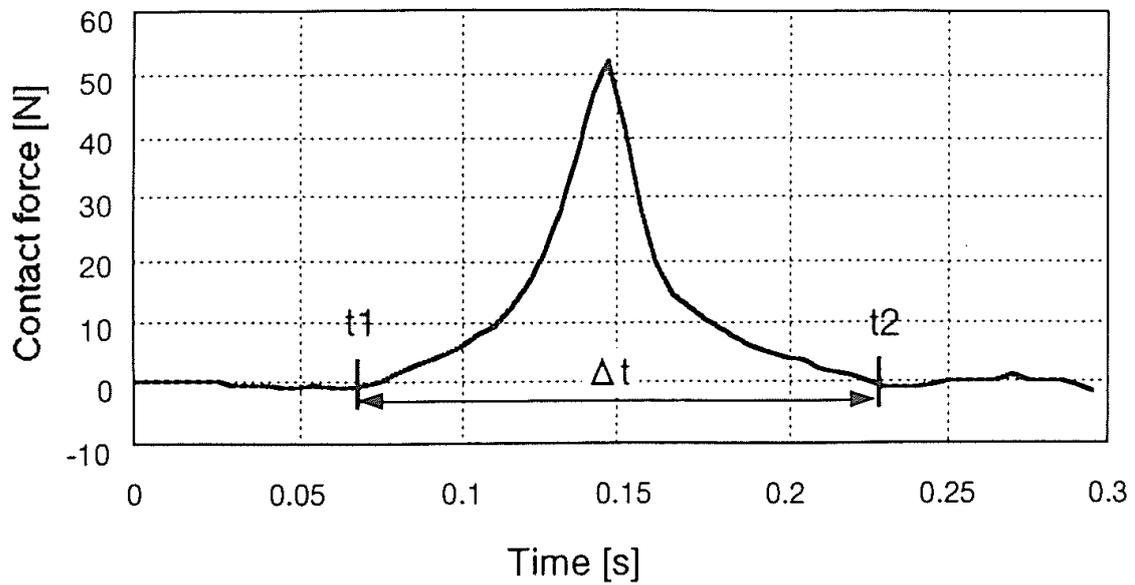


Fig.2-7 Example of transient impact stimulus for human pain tolerance evaluation

10から50代の男性被験者13名に対して、各測定部位 c、e、gについて測定した。その結果を図2-8に示す。

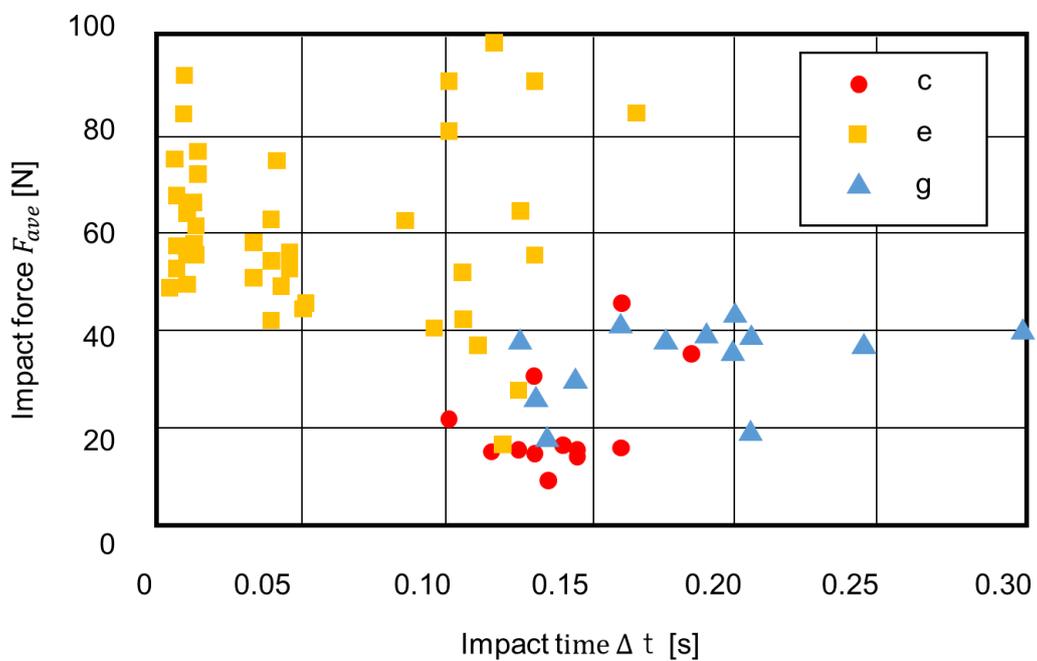


Fig.2-8 Experimental results of transient human pain tolerance

衝撃持続時間が小さい $\Delta t < 0.05\text{s}$ の領域では痛覚耐性値の下限は 50N 程度である。衝撃持続時間が大きい $\Delta t > 0.1\text{s}$ の領域では痛覚耐性値の下限は 10N 程度まで減少することが明らかとなった。部位ごとの差、個人の差による痛覚耐性値の差は今回の実験では 10N 程度あることが観察された。

2.3 人の痛覚耐性値の統一的記述

2.3.1 衝撃時間と衝撃力に基づく統一的記述方法

準静的な痛覚耐性値は図2-5で示した衝撃持続時間 Δt が無限大になった場合と解釈することもできる。そこで図2-8で示した過渡的な痛覚耐性値と合わせて整理した。準静的、過渡的な痛覚耐性値を統一的に記述した結果を図2-9に示す。

この結果から、衝撃持続時間が小さい $\Delta t < 0.05\text{s}$ の領域では痛覚耐性値の下限は 50N 程度である。 $\Delta t < 0.10\text{s}$ の領域では漸減する傾向がみられた。 $\Delta t > 0.10\text{s}$ の領域では部位ごとの差があるものの、痛覚耐性値の最下限は 10N 程度であることが判明した。

準静的及び過渡的な痛覚耐性値が衝撃時間と衝撃力に基づき、過渡的な領域と、準静的な2つのモードに分類して簡便な痛覚耐性値が設定できることが明らかとなった。

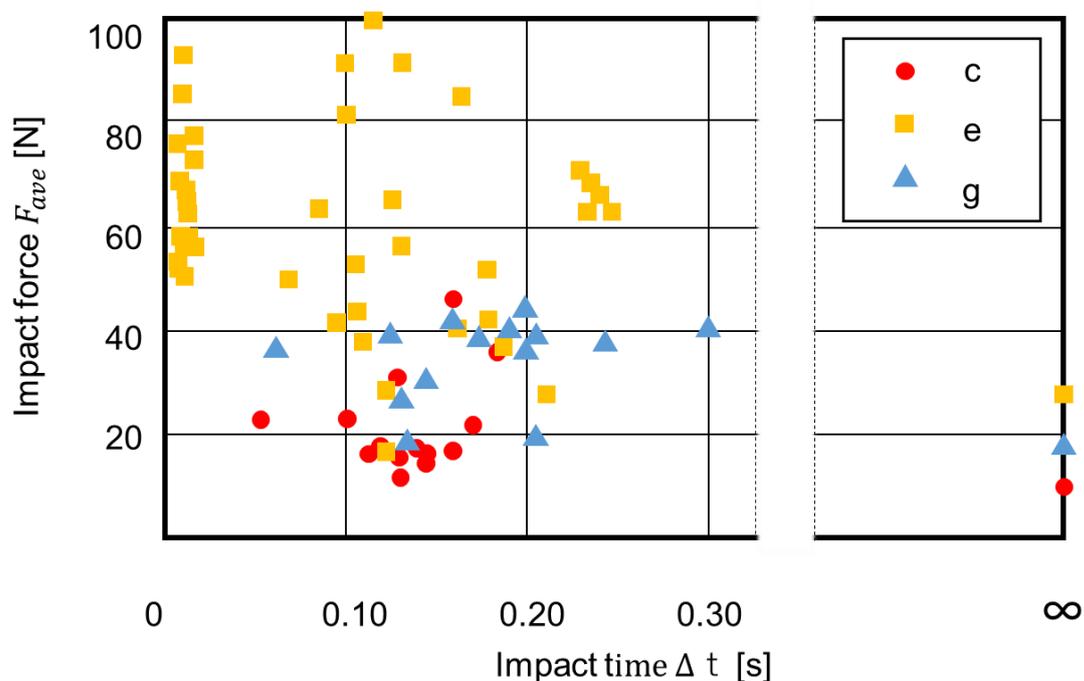


Fig.2-9 Extended results of human pain tolerance intensity curve

2.3.2 変形速度と変形量に基づく統一的記述方法

共存・協働時の安全基準としての痛覚耐性値を衝撃時間と衝撃力という物理量で記述方法を2.3.1節で提案した。

ここで、生体の機械的インピーダンスの定量化の観点から、過渡的刺激に対する等価的な質量項は十分小さいとの報告[54]があり、生体の機械的インピーダンスは等価的な粘性項とバネ項に注目すればよく、過渡的な痛覚耐性値 $F(t)$ は生体の機械的インピーダンスが規定できる場合、変形量 $\delta(t)$ と変形速度 $V(t)$ の2つの物理パラメータでも記述できることが予測される。

また一方で、痛みを評価する侵害受容器に刺激を与える立場からも、痛覚の支配的な刺激量が変形量 $\delta(t)$ と変形速度 $V(t)$ で記述できることが指摘され[56]、変形量 $\delta(t)$ と変形速度 $V(t)$ の2つの物理パラメータで記述できる可能性がある。

従って、痛覚耐性値を統一的に記述するアプローチにおいて衝撃時間と衝撃力に基づく記述方法と変形速度と変形量に基づく記述は表裏の関係であり、両方の記述方法での検証を試みることにした。

物理量とそれにより受ける感覚量との関係として物理量とそれにより受ける感覚量との関係を法則化したものとして Weber-Fechner の法則が有名であるが、より一般的な記述方式として高次項まで含めて拡張された Stevens のベキ法則に着眼して進めることにした。今回の実験で得られた過渡的な痛覚耐性値 $F(t)$ と変形量 $\delta(t)$ のデータをもとに、測定部位 c 、 e 、 g について最大変形量 δ_{\max} と最大変形速度 V_{\max} で整理した。

ここで・刺激量 Y と感覚量 X の関係として Stevens のベキ法則を適用し、式(2-1)で表現できる[56]。

$$Y = K_{s1} X_1^\alpha + K_{s2} X_2^\alpha + \dots = \sum K_{s_i} X_i^\alpha \quad (2-1)$$

ここで、 K_{s_i} 、 α は定数である。

これを痛覚の場合に適用すると、痛覚の刺激量として皮膚の最大変形量と変形速度が指摘されている[57]ため、最大変形量 δ_{\max} と変形速度 V_{\max} に対する痛覚強度 Y_{pain} の関係は式(2-2)で表現できる。

$$Y_{\text{pain}} = (K_{s1}/K_{s2}) \delta_{\max}^\alpha + V_{\max}^\alpha \quad (2-2)$$

各データはプローブの材質を考慮すると剛体と考えられる。従って δ_{\max} と V_{\max} はそれぞれ人の皮膚変形量と変形速度と見なすことができる。そこで、各被験者の感覚量である痛覚強度 Y_{pain} を1と設定し、式(2-2)に示すモデルで各部位のデータを最小二乗法[58]で同定した。得られた曲線(Pain intensity curve: PIC)を図2-10に示す。

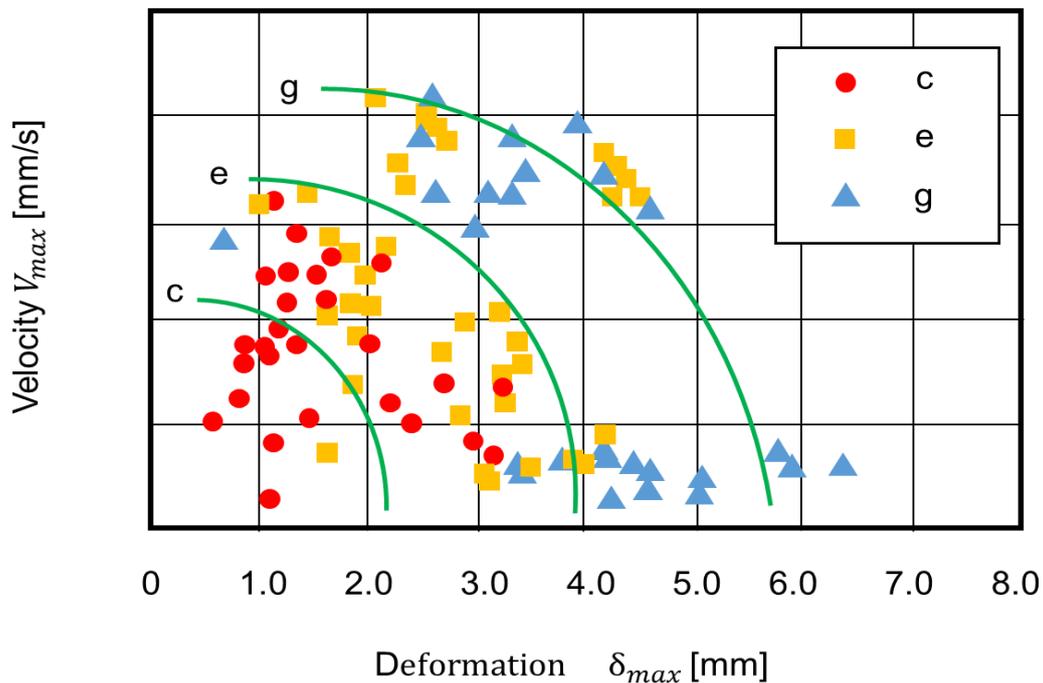


Fig.2-10 Relationship between human body deformation and velocity for human pain tolerance and PIC fitting

同定した各パラメータを表2-2に示す。

Table.2-2 Estimated Stevens parameters for PIC

	c	e	g
α	1.5	1.5	1.5
K_{s1}/K_{s2}	5.5	4.7	4.3

この結果から、痛覚の刺激量を δ_{max} 、 V_{max} として、両者間には Stevens のベキ法則が成立し、どの部位も刺激量を δ_{max} 、 V_{max} のそれぞれの 1.5 乗の和で表現できることが判明した。準静的、過渡的な場合の耐性値が力を観測する耐性値記述と皮膚変形量と変形速度でも記述できる可能性があることが明らかとなった。

以上の考察から示されることは、人の痛覚が皮膚及び人体の表層の変形量と変形速度を計測することで人の痛覚を準静的、過渡的な場合をセンシングできることである。

力で表現する場合は準静的、過渡的な接触現象について場合分けする必要があつた。Stevens のベキ法則による表現は準静的、過渡的な領域に場合分けをする必要が無いことが特長である。観測する物理量に従い、痛覚耐性値を使い分けることができることを明らかにした。

2.4 ロボット安全基準としてのまとめ

2.4.1 痛覚耐性値の記述方法のまとめ

安全検証の段階において圧力の単位で刺激を加えると局所的な面圧が人体に与える影響が複雑であること。また、面圧で耐性値が提供できた場合においてもその測定方法や基準の設定が複雑になることから妥当性確認が難しくなることが容易に想定される。本研究において、計測のばらつきが低減できる接触面積 ($\phi 10$) に着眼し、過渡的な場合の機械的刺激量として衝撃力をとり上げ、衝撃持続時間 Δt と衝撃力の時間平均 F_{ave} で耐性値を整理した。

人の痛覚がロボットに対する予防安全の及ぶ限界を知らせる役割を担っているという観点から、痛覚耐性値評価の必要性を指摘した。そして、痛覚耐性値測定の実験概要を示した。人の痛覚耐性値を準静的な場合と過渡的な場合に分けて、それぞれ準静的許容接触力と痛覚耐性曲線を求め、侵害受容感覚としての客観性を示唆する評価結果が得られることを示した。以下本章の研究から得られた結果をまとめる。

- 1) 準静的な場合の痛覚耐性値は、力で記述でき、その痛覚耐性値の平均値は 65 から 146N、最小値は 13 から 46N であることが明らかとなった。
- 2) 衝撃持続時間が小さい $\Delta t < 0.05s$ の領域では痛覚耐性値の下限は 50N 程度である。
 $\Delta t < 0.10s$ の領域では漸減する傾向がみられた。 $\Delta t > 0.10s$ の領域では部位ごとの差があるものの、痛覚耐性値の最下限は 10N 程度である。
- 3) 痛覚耐性値を過渡的な領域と、準静的な2つのモードに分類して簡便な痛覚耐性値が設定できることを示した。
- 4) 人の痛覚の支配的な刺激量と予測される皮膚の変形量、皮膚の変形速度をパラメータに用いて痛覚耐性値を記述できることを示した。
- 5) 力の次元及び位置・速度の次元で記述した場合の両方の痛覚耐性値を示すことで、適用にあわせた柔軟な安全設計指標を示した。

2.4.2 国際規格化と産業応用への展開

本章の研究結果[15]は ISO/TS 15066 制定の考え方に採用され、その後の多くの研究へとつながっている。多くの国内外の研究機関で追加の人間工学実験結果[16][17][59]が加わり 2016 年に ISO/TS 15066 として制定されている[18]。

人の全身に対して、さらに広域かつ詳細な調査が実施された[16]。また接触力だけでなく衝突時のエネルギー密度に着眼し、接触時の人体への影響について分析が報告されている[60][61]。衝撃力が人へ影響するストレスと皮膚へのダメージを調査し、その評価方法が提

案されている[62]。力による規定のみならず、圧力の導入、エネルギー、単位面積当たりのエネルギー規定値を用いて妥当性確認するための換算方法についても述べられている[63]。人とロボットの相互作用を踏まえたロボットの安全基準として、衝撃による打撲耐性の主要パラメータに着眼し、過渡的な平均接触力と総移動エネルギーで表現する方法の提案がなされている [64]。

人と産業用ロボットの共存・協働に関わる安全ガイドラインの整備が今後も継続されていくが、その安全性検証(Verification)と妥当性確認(Validation)は2020年の現在においても、これから事例を積み重ねて整備されていく段階にある。サービスロボットの領域でも同じ流れであることが指摘されている[19][20]。

特に、妥当性確認方法は客観的証拠を提示することによって、特定の意図された用途又は適用に関する要求事項が満たされていることを確認することが要求されている。適用ごとに妥当性確認方法が様々であり、確立できていないことが現在の問題である。

そこで本章の内容を踏まえて実際の生産ラインへの適用し、共存・協働作業でのリスクアセスメントとそのリスク低減効果、安全性に関する妥当性確認方法を第4章で提示する。さらに安全性と生産性を両立する共存・協働作業の計画と実証を行う。評価指標としては身体の安全性、身体的負担感(エルゴノミクス)と気遣い作業等の負担感の低減、さらに生産性の指標として作業プロセス数に着眼し、その効果と結果を第4章に記述する。

2.4.3 まとめ

本章では第一の S-RQ としてモノづくりにおいて人とロボットの作業の中で安全なふれあいとは何か？そしてそのふれあいはどこまで許されるのか？との問いを設定した。学術的研究課題として、物理的な人への受容レベルとその判断が可能な感覚を決定し、身体的安全性を確保するために人の感じる感覚をアラート指標として記述できることを明らかにした。

第一の S-RQ に対して人とロボット共存・協働のための安全基準構築について論じた。研究テーマとアプローチとして、①知覚特性を踏まえた物理的安全受容度の検証と安全に触れ合うための痛覚耐性の明確化、②人体への過渡的・準静的な痛覚耐性値の記述を明らかにした。本研究では人の主観的な痛覚耐性によって規定し、被験者を用いた実験により、10mm 直径円柱断面の接触による押しつけ力を定めることにより、アラート指標となることを示した。学術成果は研究業績目録の業績(1)に対応する。

¶ 倫理規定への対応

本章の人間工学実験に関して測定の実施場所である産業安全研究所において、(1)目的の適正さ、(2)方法の適正さ、(3)安全性の確保、(4)被験者からの同意取得を得て、人を対象とする実験が行われた。

第3章 安全基準を踏まえた共存・協働ロボットシステム

3.1 安全な人との接触を考慮したシステム構築

3.1.1 人との共存・協働システムの先行研究と本研究のコンセプト

人とロボットとの物理的な共存及び協働ロボットシステムの実用化は、多くの産業での活用が見込まれ、直接的な支援が必要な医療・福祉分野だけでなく、生産現場において自動化が困難であった作業の生産性向上をもたらすことも期待されている[65]。この観点から、共存・協働型のロボット[66]あるいは生産システム[67]に関する研究が多数行われるようになってきている。

モノづくり分野において、人とロボットの共存・協働のしくみを活かした効率的で作業分担を可能とする生産システムの開発においては安全確保が大前提となり、最も尊重されるべき技術課題になることが指摘されている[39]。その中でもロボットによる人の接触検出技術の信頼性確保が最も重要技術であることが容易に推察される。

これまでに予防安全の観点から、非接触方式で人を検出する超音波センサや光学式センサを用いた人検出システムが提案されてきた[68][69][70]。しかしながら、上述のセンサはいずれも、死角、外乱、保守等の本質的な問題を抱えており、これらの非接触検出手段だけでは高い信頼性の確保が困難である。そこで、最後の砦としての接触検出の重要性が認識される。このアプローチは同時に、人に身体的ダメージを与える危険性もはらむため、1990年代までは研究対象として取り扱うまでには至らなかった。

本研究はこれらの要求事項を踏まえたうえで安全性をより優先的に考慮し、接触による人とロボットのインタラクションを実現することを目的としている。2000年代からは人とロボットの共存・協働化に関する研究が加速した。近年における研究状況は、協働作業空間に人が入るものの作業領域を共有しない、もしくは時間的にずらすことで、交互に作業シーケンスを行う水準であることが指摘されている[24]。

また、人とロボットの共存・協働における安全性に関わる研究は Post-collision-safety と Pre-collision-safety の2つに大きく分類され[25]、衝突回避問題あるいは人検出技術にかかわる研究が主な活動内容となっている。もう一方で、現在の規格体系の中でロボットが人と接触した場合に人が痛みを感じ始めるまでを安全規範として制御を行う Power force limiting(PFL)と不安全な接触を回避するための速度制御を規定した Speed and separation monitoring(SSM)の要求事項に対応づけられることが指摘されている[26]。

人の安全を最優先する(human-safety-oriented)ロボットシステムの設計指針に基づき構築したロボットシステムの設計手法を提案する。人の安全空間の限界を定めるために機械刺激に対する痛覚耐性[15][71]を採用する。

この痛覚耐性値に基づき、人との接触の検出ならびに非常停止を安全空間の範囲内で実行するロボットをフェイルセーフなシステムとして構築する。さらに、衝撃を緩和する適切な柔らかさの被覆の設計、選定プロセスを提供する。開発したロボットシステムを用いて共存・協働時の人とロボットの接触実験を行い、その評価結果から提案するアプローチの有効性を実証する。

以上の研究状況を踏まえて3章の研究課題として、2章で明らかとした痛覚耐性値を基準に人の痛みの感覚を取り込んだロボットシステムが人との安全な接触が可能であることを示す [72] [73]。痛覚耐性感覚を取り込んだロボットシステムが人との安全な接触が可能であることを示すため、図3-1に示すように、安全な人との接触システム構築を3.1節、接触検出機能構築を3.2節、柔らかいロボットの被覆設計を3.3節、安全制御システム構築を3.4節、開発したロボットシステムの評価を3.5節で整理する。

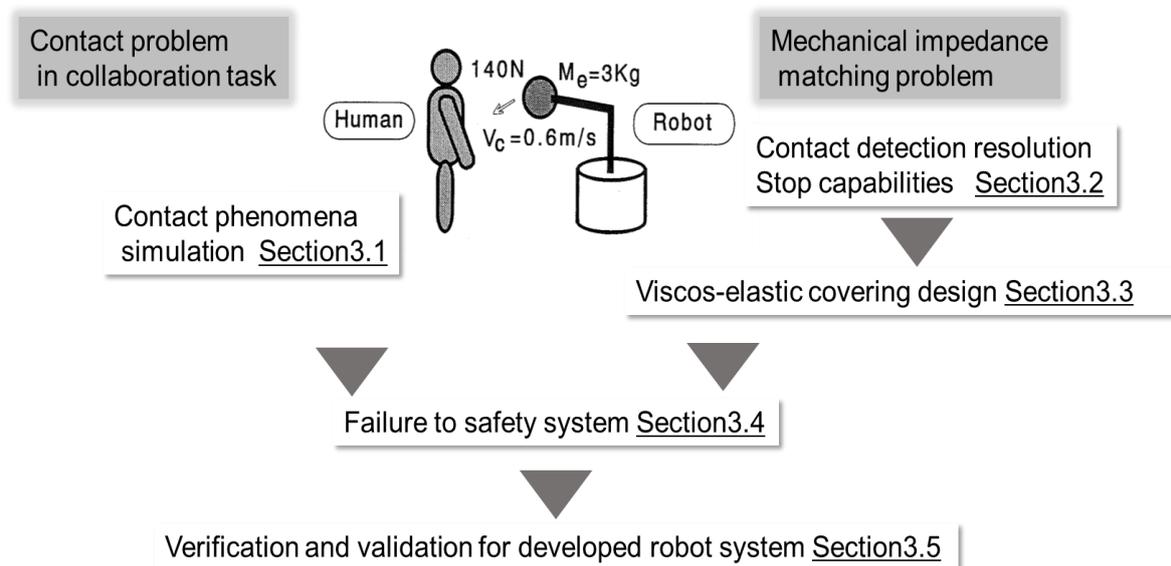


Fig.3-1 General design flow-chart in chapter 3 for safe coexistence and collaboration robot system development

3.1.2 想定する共存・協働作業

本研究で想定する共存・協働作業はモノづくり領域での比較的小さな部品の組付けや製品自身の位置、姿勢決め、搬送作業を支援することを考えた。これは、重量物などの搬送や組付け作業、高速で動作するツールや加工機に関わる作業などは人への安全リスクが高いこと、人作業をすべてロボットに実施させ完全な自動化を目指すのではなく人作業の付加価値を向上させることが技術展開のための第1フェーズと考えた。タスクレベルが高い作業は人、タスクレベルが低い作業をロボットに担当することで、生産システム全体の実現性と定着性を確保することを目指した。

システム検証のための具体的な作業想定とそのイメージとして、多品種パーツの単純な繰り返しピックアンドプレースであるとし、共存・協働作業空間内でスイープ動作を行う。作業者はロボットの近傍で共存・協働作業を実施することを想定し、作業状態のチェックやエラーリカバリを行う。なお、第3者が作業空間へ侵入することの防止を行い、部品の飛散等のリスクはないことを前提とする。

次に、接触前提条件を検討する。痛覚は、人の皮膚に機械を押し込む際の変位量と速度に依存して発生する[57]と指摘されている。また、痛覚に関係の深いとされる接触圧力値によって痛覚耐性を表現することも可能である。しかし、人とロボットの共存・協働作業では、ロボットシステムが自ら検知することができ、有効活用できる情報として痛覚耐性が表現されなければならない。この観点から、人とロボットの接触時に、皮膚変位や接触面積を時々刻々精度良く測定することは困難である。したがって、押し込み変位や速度、あるいは接触圧力を物理パラメータとして痛覚耐性を表現しても、そのままでは利便性が低いと判断し、力に基づく痛覚耐性値を採用することにした。

人とロボットが触れ合う際の接触面積を検討するために、人体表面を対象としてロボットを剛体と考えて押し当てるケースを想定する。この場合、測定される接触カデータのバラツキが不可避であるが、文献[54]によればφ10mmの接触面をもつプローブを用いた人体胸部への測定実験による接触力データのバラツキが最も低いと報告されている。本研究ではこの知見に基づき、面積がφ10mmの面積以上をもつ接触条件のもとに実験を行い、痛覚耐性を評価することにした。共存・協働作業のリスクアセスメントを想定することからも、安全上、鋭利なワーク、治具、ハンドとの接触はなく、面積がφ10mmの面積以上をもつ接触を対象とする。

接触と挟まれ状況を想定した2つのリスクアセスメント [74]を実施する。人の体の一部が2リンクロボットの第1(根元側)、第2リンク(先端側)のいずれかに衝突する過渡的接触、両リンク間に挟まれる準静的接触のいずれかが想定される。したがって、人に加えられる身体的ダメージは、まず、体性感覚への過度の刺激に起因するものと考えられる。そこで、これによって発生する痛覚耐性を調べロボットに対して人が耐えることができる安全空間として定めることとした。

また、本研究では精神的なダメージについてのリスクに対してもあわせて考慮した。隣接するロボットの動作が、非接触の状態でも人に心理的恐怖を与えないように、ロボットの先端速度、加速度に制限を設定し、これに基づいて被覆の設計を織り込むこととした。

3. 1. 3 本研究における痛覚耐性値の設定

本研究では被験者16名に対する実験から痛覚レベルの準静的、過渡的な耐性値を求め、痛覚耐性値を2章の中で示した[15][71]。衝撃の持続時間 Δt とその間発生する衝撃力の時間平均(実効値) F_{ave} の関係を表しており、本章でもこの表現方法を採用する。

人工学的観点から人体上に選定した図2-3に示す全12箇所の測定部位のうち、モノづくりの世界では頭部、顔、脚などは保護具が慣例的に使われることが定着している。安全確保がすでに実質的に確保できている部位を除き、かつ接触頻度とその影響度が比較的大きいと推察され、痛覚耐性値が低い接触想定部位としてc、e、gの3か所を選定した。

一般的な共存・協働作業をモノづくり分野で想定した場合に、 $\phi 10 \text{ mm}$ 以下の場合には切創や剥奪創などの別の傷害モードが想定されるので $\phi 10 \text{ mm}$ の基準面積あたりの耐性値を超えないように設計する必要がある。

人の体とロボットが接触した場合の動的な挙動をロボット側の表面材質のインピーダンス、言い換えれば材料を変えることで剛性、粘性係数を調整することを踏まえた実際の設計方法について3.3節にて明らかにする。

第2章で接触面積が $\phi 10 \text{ mm}$ の痛覚耐性値を明らかにした。ここで人の表面の柔らかさによって人体の各部位がどの程度接触面積が変化をするか調べてみた。ガラスプレートに人体の各部位を押し当てるとその接触形状は半楕円体となり、面積 S_{\min} は楕円形状となる。その際の S_{\min} の最小値は図3-2に示すように、約 363 mm^2 程度となった。このことから実用上のロボットの表面が剛体と仮定しても、 $\phi 10$ の面積の約5倍以上の接触面積が確保できることが想定される。

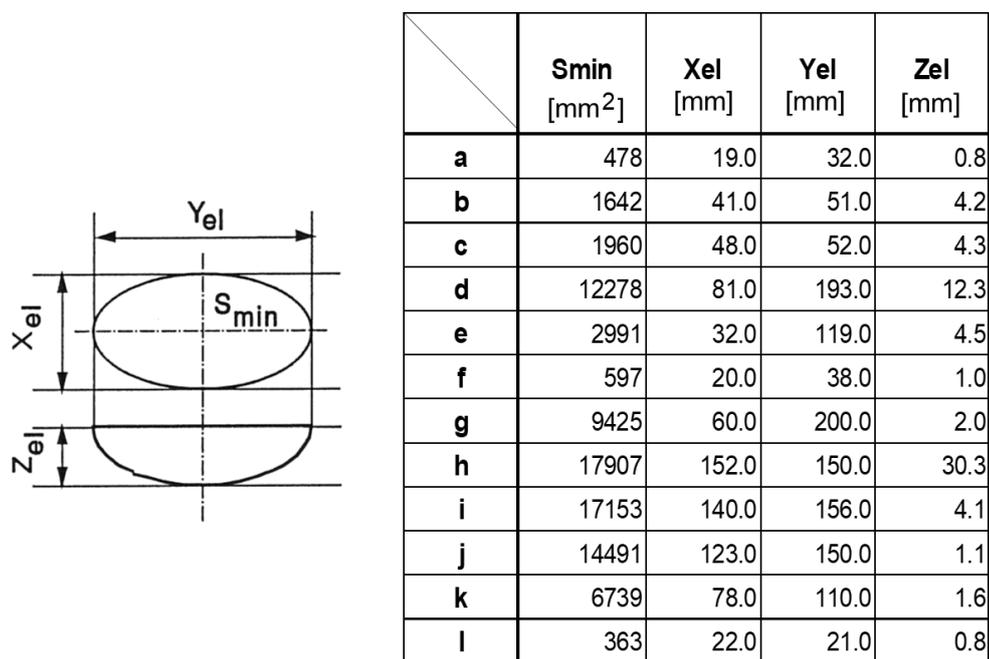


Fig.3-2 Practical contact shape and area between human and robot

以上の状況を踏まえて、各部位の下限值から得られる痛覚耐性値曲線を Δt に依存せず に満足する最小値の耐性値を採用する。2章で記述された痛覚耐性値の最小値である 10 N

の5倍程度を本研究の痛覚耐性値と定めその値を接触力 $F_c=50\text{N}$ と設定し、設計指標として取り扱うこととした。本研究では図3-3に示す痛覚耐性値で評価を進めることとする。

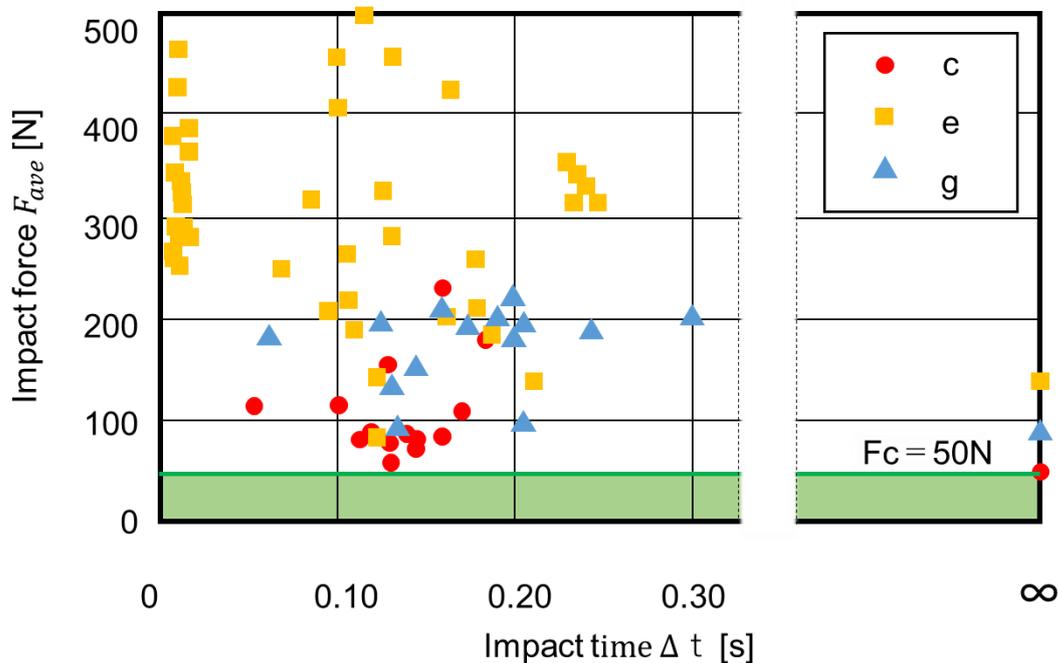


Fig.3-3 Relationship between impact duration time and mean impact force based on human pain tolerance limit in chapter 3

3. 1. 4 人とロボットの接触シミュレーションとその結果

人とロボットの接触時に発生する問題を明らかにするために、人を剛体としてモデル化できるロボットとの衝突シミュレーションを実施した。ロボットの接触部の有効質量 $M_e=3\text{kg}$ として、ロボットマニピュレータを相対速度 $V_c=0.6\text{m/s}$ でさせることを想定した。その際のロボットの最大発生力は $F_{\text{max}}=140\text{N}$ に設定した。この概要を図3-4に示す。

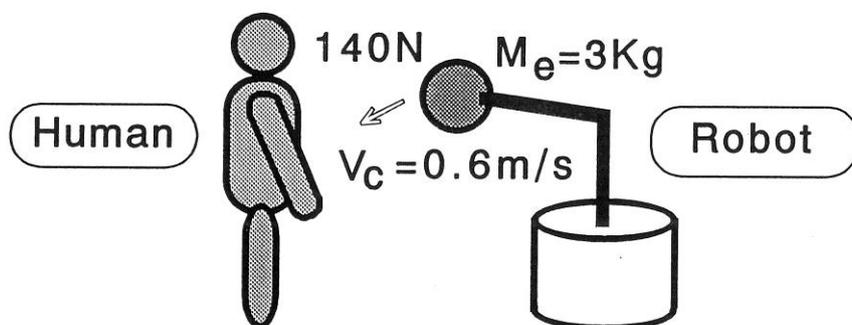


Fig.3-4 Simulation conditions for collision between robot and human

人とロボットの接触時の挙動として、衝撃持続時間 Δt を実験的に求めるため、人の第5中手骨頭縁の尺側(空手チョップをする部位)に対してアルミ、堅いゴム、柔らかいゴム、堅いウレタンを表面に装着したときの衝撃力波形第1主波の最大値、衝撃持続時間をロードセルの出力により求めた。その際の衝撃持続時間 Δt はそれぞれ 0.01、0.03、0.05、0.08s となった。運動量と力積の関係から得られた衝撃波形を三角関数波形でモデル化した。

つぎに、本研究で利用するロボットマニピュレータに位置偏差を与えたときに発生するアクチュエータトルクが1次応答特性を示すことから、その時定数を基にモデル波形を構成した。以上によって得られた2つのモデル波形を重ね合わせることによって、図3-5で示す Δt をパラメータとする接触力の時間的変化 $F(t)$ のシミュレーション波形を得た。この結果から以下の2つの要件が明らかとなった。

- (1) 衝突初期に発生する衝撃力 (impact force) がロボットの材質が硬い場合、接触時の衝撃力が高くなり痛覚耐性値を超えてしまう。 Δt を長くしてこれを緩和するメカニズム、すなわち典型例として柔らかい被覆の装着がロボットシステムには必要である。
- (2) 柔らかい材質を採用し初期の衝撃力が緩和されても、時間が経過にともない、ロボット自身に挟まれる力が増加する。ロボット動作の停止制御を実行しない場合、接触力は大きくなり (Jammed force)、やがて痛覚耐性値を越えてしまう。したがって、ロボットシステムは速やかに接触を検出し停止制御を実行する機能を備えていなければならない。

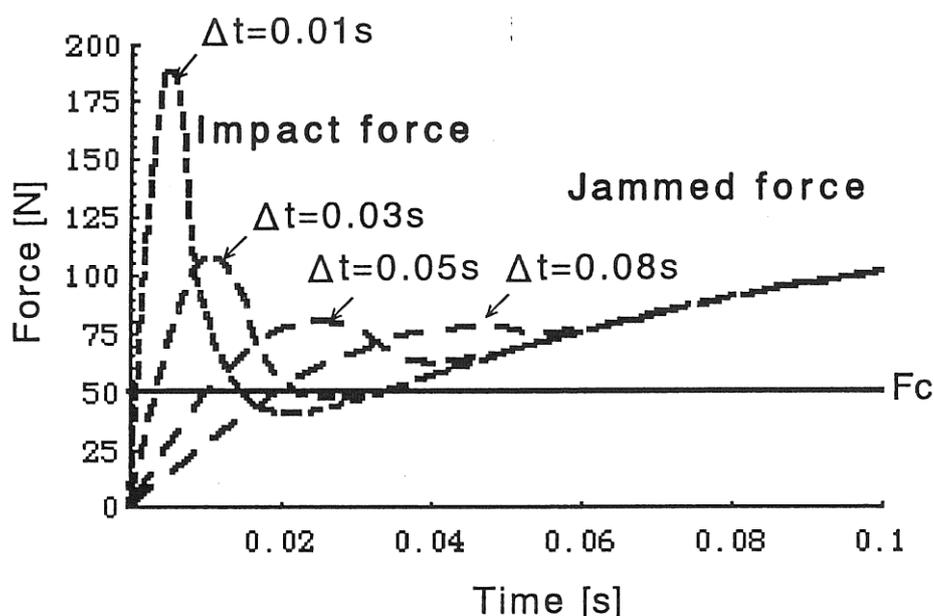


Fig.3-5 Simulation results of transient and quasi-contact between human and robot covering with various materials

3. 1. 5 痛覚耐性感覚を取り込んだロボットシステムの設計プロセス

衝撃力を緩和し、かつ早く接触検出しロボットを停止させるシステムを実現するために、人とロボットを2つの物体として考え、双方の接触時における衝撃力の最小化問題として取り扱う。機械的インピーダンスマッチング問題として図3-6に示す設計プロセス構築し実機評価と確認を進めることとした。

システム構成の要件として、痛覚耐性値 $F_c < 50\text{N}$ であることを、人が精神的なストレスや恐怖心を引き起こさないように、ロボットの先端速度 $V_c \leq 0.6\text{m/s}$ [11]および、加速度 $\alpha \leq 4.9\text{m/s}^2$ [75]をその動作条件として利用し、これに基づいて被覆の設計の前提条件として織り込むことにした。

ロボットの選定の考え方として、産業用ロボットで市販されているものを採用し、簡便な接触検出能力を特殊なセンサを付加せず実現することとした。これは、複雑なセンシングシステムを採用すると将来の実用化の際に安全性と信頼性確保が困難になると想定したためである。

より正確な接触検知のためには機械誤差及び外乱因子をできる限り排除したいため、回転減速機を採用しないダイレクトドライブ方式(以降 DD 方式)のロボットを採用することとした。ロボットはセイコーエプソン製スカラ型ロボット(SSR-H604DN)で横河プレシジョン製のDDモータが第1軸にDR1220E、第2軸にDR1045Bがそれぞれ採用される駆動構成となっている。

具体的な、ロボットシステムの設計から安全システムの構築、人との接触を想定した安全性評価の流れを以下のステップ1から4にて進める。

<Step1>

最初の設計ステップとして採用したロボットの接触検出能力について外乱オブザーバを用いて明らかにする。そのうえで接触検出から停止までの能力としてその整定時間を明らかにする。

<Step2>

次のステップとして衝撃力を緩和し、かつ接触検知から停止制御までを行うことができるロボットの被覆設計を行う。

<Step3>

そのうえでシステム全体の安全性を確実に確保するために制御回路は制御カテゴリレベルをカテゴリ4で構成した。

<Step4>

最後のステップとして設計したシステムに対して、シミュレーションを用いて人と接触時に安全に停止することを検証した。そのうえで実際のシステムを用いて人との接触実験と評価を行う。

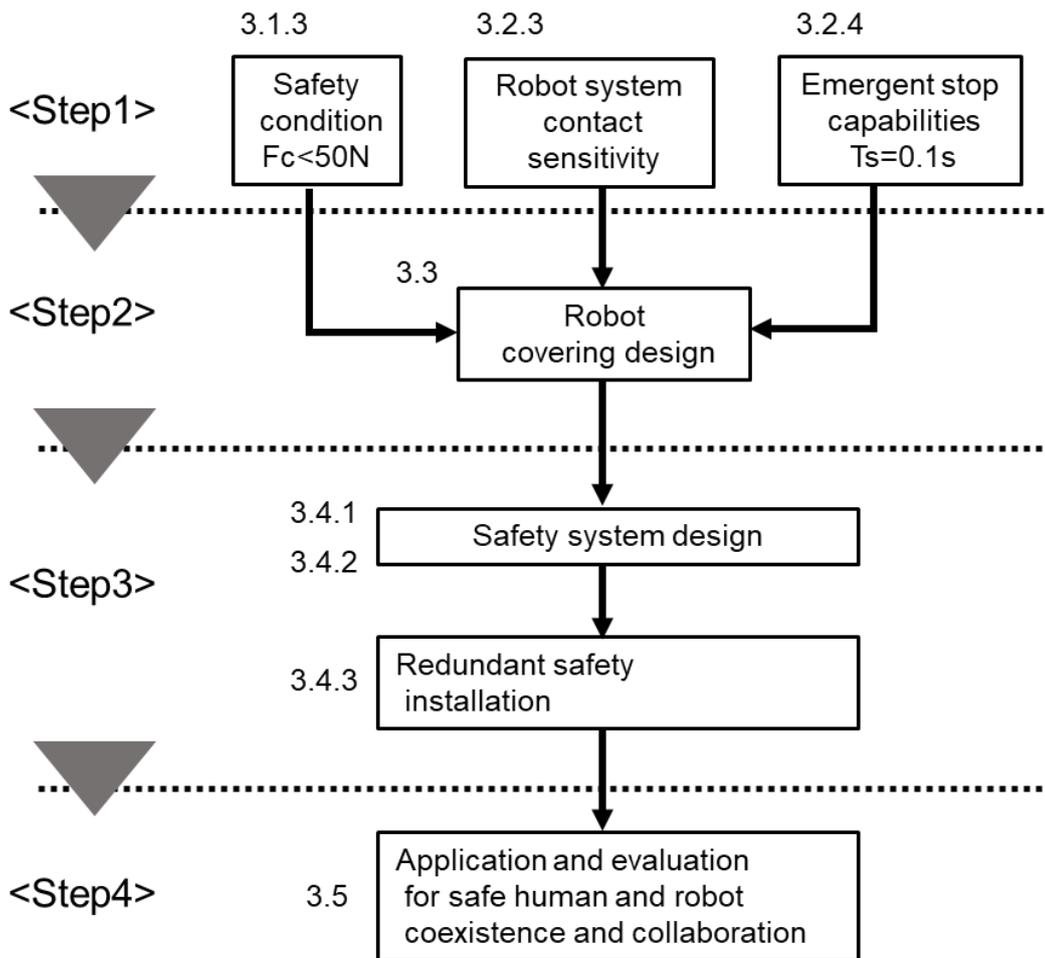


Fig.3-6 Design process for robot system with safe contact detection and stop capabilities

3. 2 ロボットの動的特性の把握

3. 2. 1 外乱オブザーバを用いたフェイルセーフな接触検出

簡便にセンサレスで接触検出する方法として外乱オブザーバ[76]を利用したものが報告されている。接触検知をセンサレスの接触検知とあわせて回避動作に対応するためにカメラを利用した研究も報告されている[77]。

対象や環境を既知とした研究であり、外力を検出することを目的としていない研究が多かった。そこで人との安全な接触検出能力について外乱オブザーバを用いて検出できるのかを確認することとした。

一般的な産業用マニピュレータでは駆動部にギアの伝達ロス、バックラッシュなどの非線形要素があることが筆者らの調査で判明している[78][79][80]。これらの非線形誤差は動的モデルの推定精度に影響が出ることも指摘されている[81]。従って、非線形要素を有する仕組みでは簡便にセンサレスによる接触検出が構成することが困難と考えた。

DD モータによるシステムでは上記のような問題を非常に小さく抑えられる特長を持つ。モデル規範型のダイナミクスモデルの理論はすでに提唱されており[82]、今回採用したシステムで接触検出の能力がどこまで高められるか検証を行う。

特に静的、動的な伝達誤差の補償方法については多くの報告があり[81] [83]、本研究においても一般的なダイナミック補償モデルを採用することとした。

オブザーバとしては、2自由度マニピュレータ実機からのトルク参照出力 τ_r と各パラメータを最小二乗法により同定した動力学モデル式(3-1)で表現できる。

$$I(q) \ddot{q} + h_{nl}(q, \dot{q}) + h_l(q, \dot{q}) + T_g(q) = \tau_r$$

$$h_{nl}(q, \dot{q}) = \dot{I}(q, \dot{q})\dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} \left\{ \dot{q}^T I(q) \dot{q} \right\}$$

$$h_l(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T K \dot{q}$$

$$T_g(q) = \frac{\partial u}{\partial q}$$

where

$h_{nl}(q, \dot{q})$; factor of centrifugal and Coriolis force

$h_l(q, \dot{q})$; friction factor

$T_g(q)$; gravity factor

(3-1)

この方法の特長として人との接触に起因して発生するロボットのジョイント部への外乱トルクを検出する機能を実現した。

外乱オブザーバを適用すれば余分な外界センサを用いることなくマニピュレータリンク部に加えられる外力を検出できるので、触覚センサ等を分布した場合に発生する死角が存在しない長所を有する。また、余分な信号処理を必要としないためにシステムの信頼性低下や煩雑な保守の必要性を生じないと考えられる。そこで、上記のコンセプトを実現するために計算されるジョイントトルク値 τ_r とコントローラからのトルクモニタ信号との差分を取ることで求める構造にした。ただし、上式において、 q はジョイント角変位ベクトル、 $I(q)$ はマニピュレータの慣性テンソル、 $h_{nl}(q, \dot{q})$ 、 $h_l(q, \dot{q})$ はそれぞれ、非線形の遠心力およびコリオリカなど、線形の摩擦力を表すベクトルである。

接触力を外力ととして認識し検出するために今回考案した外乱オブザーバのシステム構成図を図3-7に示す。

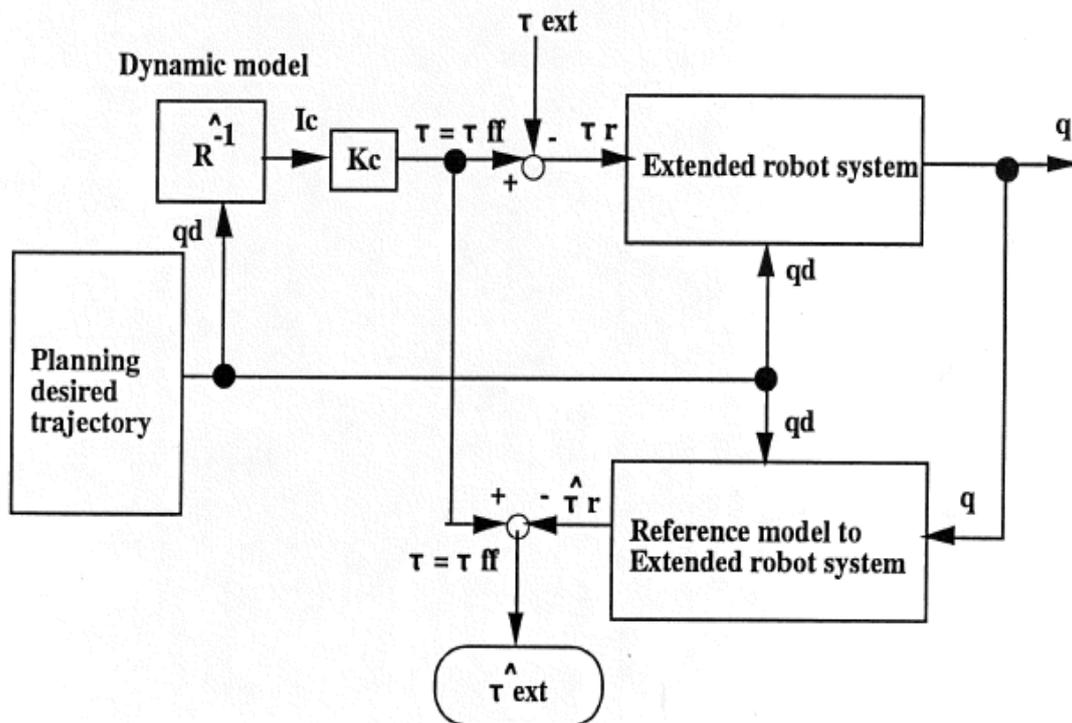


Fig.3-7 Block diagram of senseless contact detection system for safe human and robot coexistence and collaboration

ここで、トルク τ はモータ電流 I_c をモニタリングすることで観測できる。このときの電流とトルクの換算係数を K_c とする。また、軌跡生成の目標値となる q_d は全て既知の数値となる。ここで外乱オブザーバを構成するモデルは正確に同定されているものとする。

式(3-2)に示すようにマニピュレータの動作上で推定されるトルクから観測されるトルクの差分とすることで外力検出する。

$$\hat{\tau}_{ext} = \tau - \hat{\tau}_r \quad (3-2)$$

提案する接触検出システムを市販されている産業用の2リンクDDロボット(SEIKO EPSO N製:SSR-H604DN)に適用した。ダイレクトドライブ方式のため減速機などの摩擦変動などの外乱要因を低くでき、接触検出の精度を確保することを目的に採用した。

採用したロボットは横河プレジジョン製のダイレクトドライブモータを採用している。1軸目にはモータ型式 DR1220E、2軸目にはモータ型式 DR1045B にて構成されている。この全体の構成を図3-8に示す。

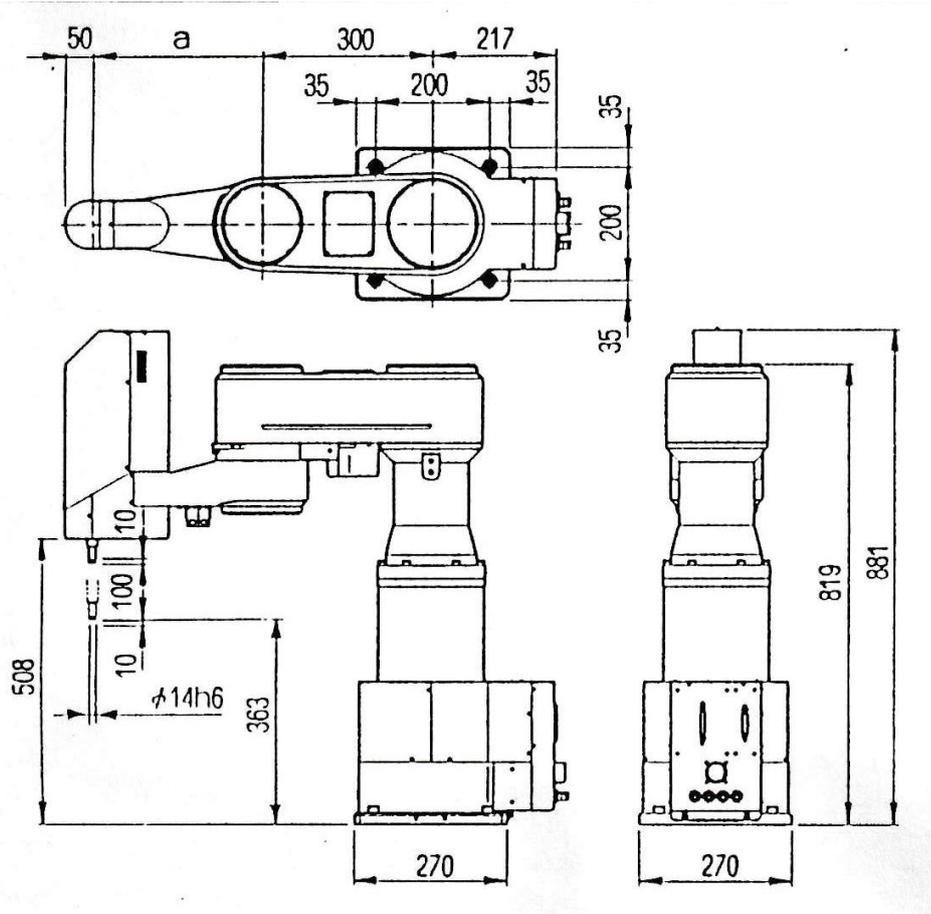


Fig.3-8 Configuration of employed 2-link direct drive manipulator

ダイレクトドライブ方式の特長として所望の指定トルク τ に必要なモータ電流 I_c に線形関係があることが知られている。本ロボットの τ と I_c の関係を図3-9に示す。

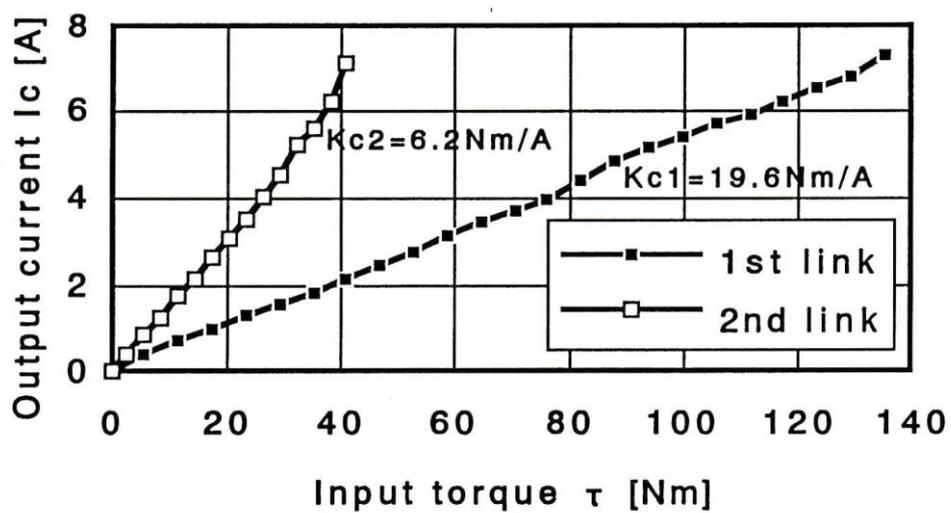


Fig.3-9 Relationship between input torque and output current

ダイレクトドライブ方式の課題として使用率が上がった場合の熱による影響、非常停止時の惰走距離が長くなる傾向、アーム保持力確保への対応が必要である。今回は研究、評価のため使用率は高くならないので影響は非常に小さい。非常停止時の対応としては今回採用したロボットがダイナミックブレーキとエア源で駆動される機械式ブレーキを併用したものを採用した。非常停止信号入力から実際の停止まで最大で $T_s=0.1s$ 程度かかることが判明しており、これらを考慮したうえでシステム設計することとした。

3. 2. 2 最小二乗法によるシステム同定

システム同定には主に2つの方式が提唱されている。1つは実験的な手法に基づく推定方式[81][85]、もう一方は最小二乗法によるモデル同定方式[79]である。

今回はロボットのダイナミクスモデルが線形表現できるので最小二乗法によるセンサレスで接触検出するモデル同定を行う。図3-10に今回採用したDDマニピュレータのモデルの定義を示す。

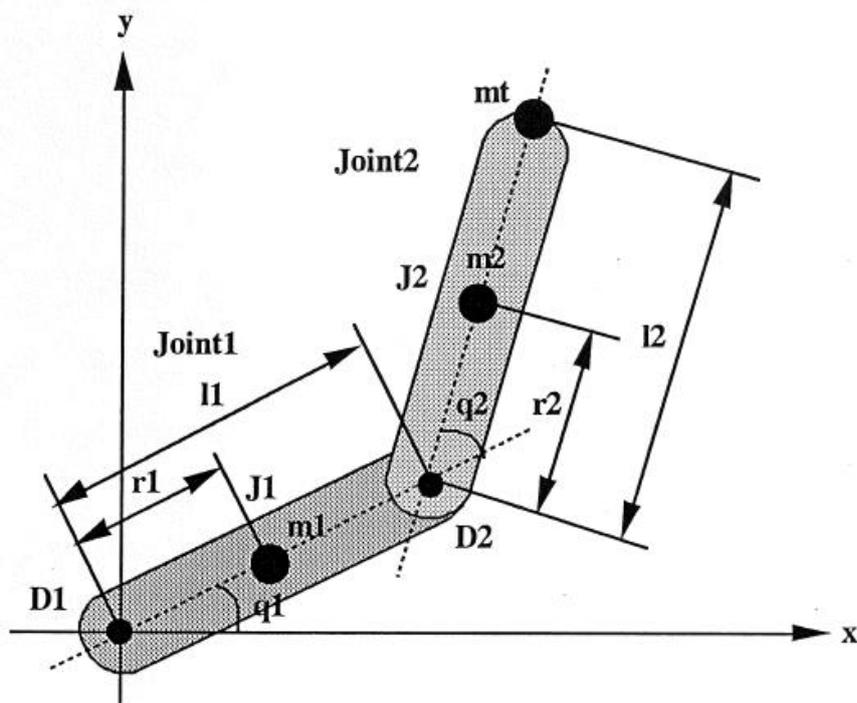


Fig.3-10 Mechanical parameters for adopted DD-manipulator

式(3-3)にマニピュレータとコントローラを1つの系としてまとめた、ダイナミクスモデルを示す。なお、数式内の各変数及び記号は巻末の用語・記号の定義に記述する。

$$I(q) \ddot{q} + h_{nl}(q, \dot{q}) + h_l(q, \dot{q}) = \tau_r$$

where

$$I(q) = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{bmatrix}$$

$$I_{11} = J1 + J2 + m1 r1^2 + m2 \left\{ l1^2 + r2^2 + 2 l1 r2 \text{Cos}(q2) \right\}$$

$$I_{12} = I_{21} = J2 + m2 \left\{ r2^2 + l1 r2 \text{Cos}(q2) \right\}$$

$$I_{22} = J2 + m2 r2^2$$

$$h_{nl}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h_{nl1}(q, \dot{q}) \\ h_{nl2}(q, \dot{q}) \end{bmatrix}$$

$$h_{nl1}(q, \dot{q}) = -h q2^2 - 2 h \dot{q}1 \dot{q}2$$

$$h_{nl2}(q, \dot{q}) = h q1^2$$

$$h = m2 l1 r2 \text{Sin}(q2)$$

$$h_l(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h_{l1}(q, \dot{q}) \\ h_{l2}(q, \dot{q}) \end{bmatrix}$$

$$h_{l1}(q, \dot{q}) = k1 \dot{q}1 + Kv1 (q1_d - \dot{q}1) + Kp1 (q1_d - q1)$$

$$h_{l2}(q, \dot{q}) = k2 \dot{q}2 + Kv2 (q2_d - \dot{q}2) + Kp2 (q2_d - q2)$$

(3-3)

今回の制御対象は比較的モデル構築が容易でかつ、パラメータ同定のためのデータ数も十分確保できる。したがって、最小二乗法によるパラメータ同定方法を採用した。式(3-4)に式(3-3)から観測可能な τ_r と Ω 、そして未知のパラメータ b で表現できる。

本章の検証時に使用する動作プログラムを活用して、時々刻々と変化する τ_r と Ω のデータを格納する。次に式(3-4)の連立方程式を解き、未知のパラメータ b を求める。

求めるパラメータ b を最小二乗法で推定する方法としては、式(3-5)で表現される。システム同定のために使用する動作プログラムは十分なダイナミックレンジと推定誤差の影響を最小限に抑える必要がある。そのため、実際の安全な接触と停止動作を評価する場合と同じプログラムを活用しシステム同定を行った。

$$\tau_r = \Omega b$$

where

Known values

$$\tau_r = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Kc1 Ic1 \\ Kc2 Ic2 \end{bmatrix}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & \Omega_{13} & \Omega_{14} & \Omega_{15} & \Omega_{16} & \Omega_{17} & \Omega_{18} & \Omega_{19} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & \Omega_{23} & \Omega_{24} & \Omega_{25} & \Omega_{26} & \Omega_{27} & \Omega_{28} & \Omega_{29} \end{bmatrix}$$

$$\Omega_{11} = \dot{q}_1$$

$$\Omega_{12} = (2 \dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_2) - (2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \sin(q_2)$$

$$\Omega_{13} = \dot{q}_2$$

$$\Omega_{14} = \dot{q}_1$$

$$\Omega_{15} = \dot{q}_{1d}$$

$$\Omega_{16} = \dot{q}_{1d} - \dot{q}_1$$

$$\Omega_{17} = 0$$

$$\Omega_{18} = 0$$

$$\Omega_{19} = 0$$

$$\Omega_{21} = 0$$

$$\Omega_{22} = \dot{q}_1 \cos(q_2) + \dot{q}_1^2 \sin(q_2)$$

$$\Omega_{23} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2$$

$$\Omega_{24} = 0$$

$$\Omega_{25} = 0$$

$$\Omega_{26} = 0$$

$$\Omega_{27} = \dot{q}_2$$

$$\Omega_{28} = \dot{q}_{2d}$$

$$\Omega_{29} = \dot{q}_{2d} - \dot{q}_2$$

unkown values

$$b = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 \end{bmatrix}^T$$

$$b_1 = J_1 + J_2 + m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + r_2^2)$$

$$b_2 = m_2 l_1 r_2$$

$$b_3 = J_2 m_2 r_2^2$$

$$b_4 = K_1 - K_v1$$

$$b_5 = K_v1$$

$$b_6 = K_p1$$

$$b_7 = K_2 - K_v2$$

$$b_8 = K_v2$$

$$b_9 = k_p2$$

(3-4)

データ空間を m とし、未知の b を観測可能な τ_r と Ω のデータを活用し、最小二乗法で b を導出する。導出方法は式(3-5)にて表現できる。

$$\left. \begin{aligned}
 & b = [\Omega^T \Omega]^{-1} \Omega^T \tau_r \\
 & \text{where} \\
 & \tau_r \in R^{m \times 1} \\
 & \Omega \in R^{m \times 9} \\
 & b \in R^{9 \times 1} \\
 & m ; \text{ dimension value of experimental data}
 \end{aligned} \right\} (3-5)$$

本研究のシステムの同定及び性能評価実験に用いるプログラムの動作パターンと実際に発生しているトルク、システム同定後に推定したトルクをまとめたものを図3-11に示す。動作パターンとしては1軸、2軸が一定の加速度、速度でXY面上を動作するように設定した。

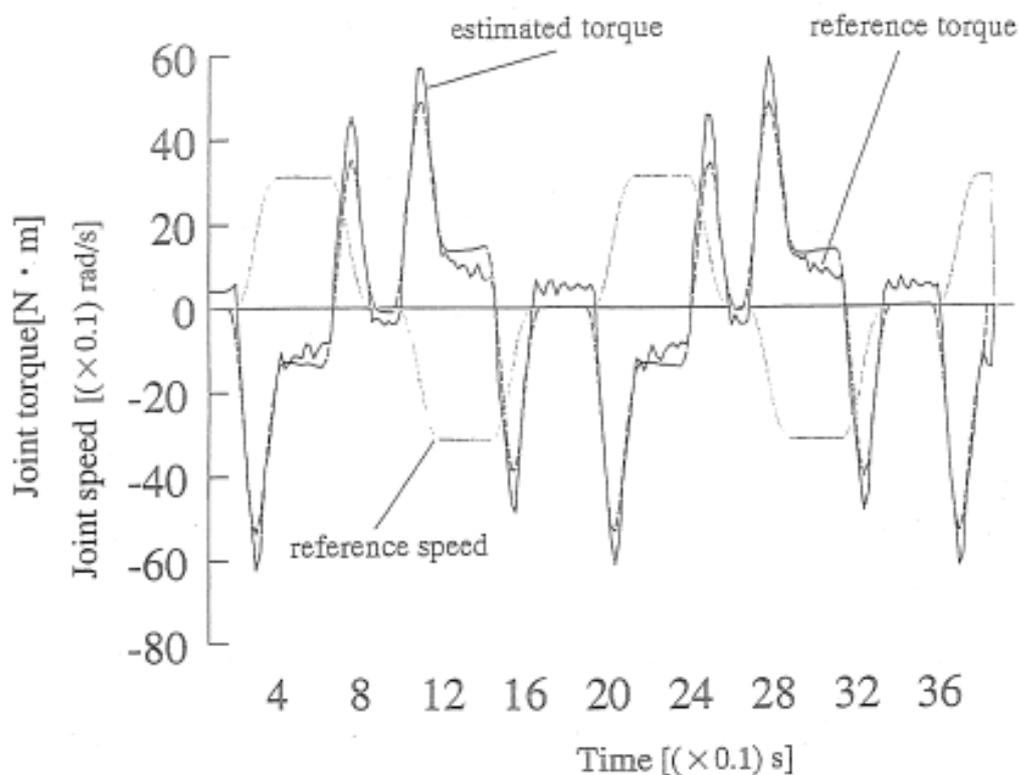


Fig.3-11 Output example of disturbance observer for estimated torque

この動作パターンを用いてシステム同定を行い、未知のパラメータ b を最小二乗法にて導出した結果を表3-1に示す。

Table3-1. Identified parameters by least square method

b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
1.11363	0.02676	0.02857	0.45192	24.9858	4.40293	1.74532	24.5013	1.72945

3. 2. 3 センサレスによる接触検知と停止機能の確認

システム同定したパラメータを用いた外乱オブザーバを利用して接触検知と停止性能の評価を行った。準静的な検出性能を評価するため、回転中心から小さい距離ほどセンシティブティが落ちることから接触ポイントを回転中心から $L_{\min}=0.1\text{m}$ の位置に設定した。事前に既知の力を加え、推定した力と合うか検証を行った。この結果、十分な線形性が確保することが確認できた。この結果を図3-12に示す。

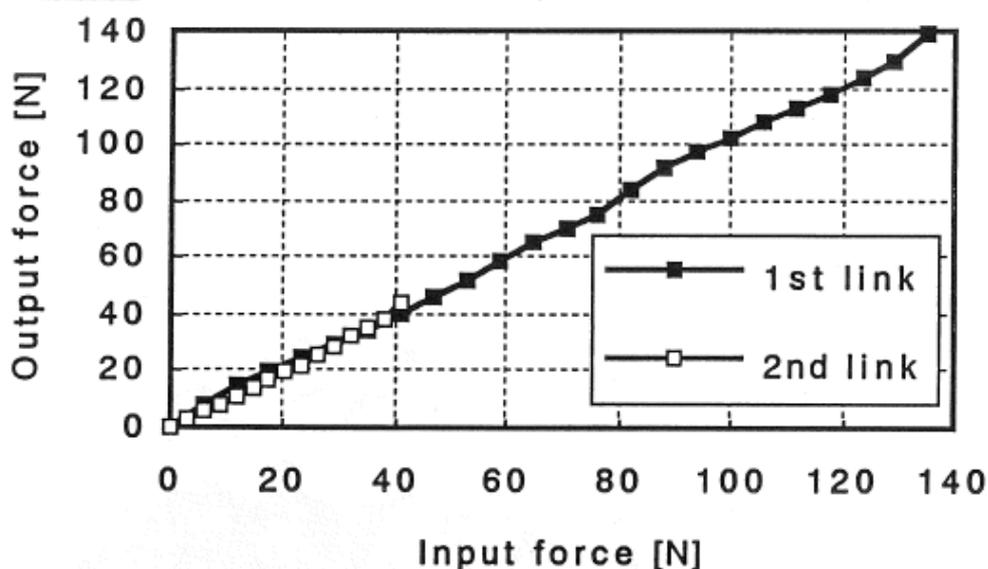


Fig.3-12 Static characteristics of proposed system

次に過渡的な接触検出を可能にする力の感度 F_s として、検出システムの分解能の評価を外力 $\tau_{\text{ext}}=0$ の時について実施した。図3-13はその際の各軸の推定誤差を各軸について整理したものである。この結果、各軸の分解能 $F_{s1}=10\text{N}$ 、 $F_{s2}=5\text{N}$ 程度となった。痛覚耐性値 $F_c=50\text{N}$ に対して5分の1から10分の1の分解能が確保できることを確認した。

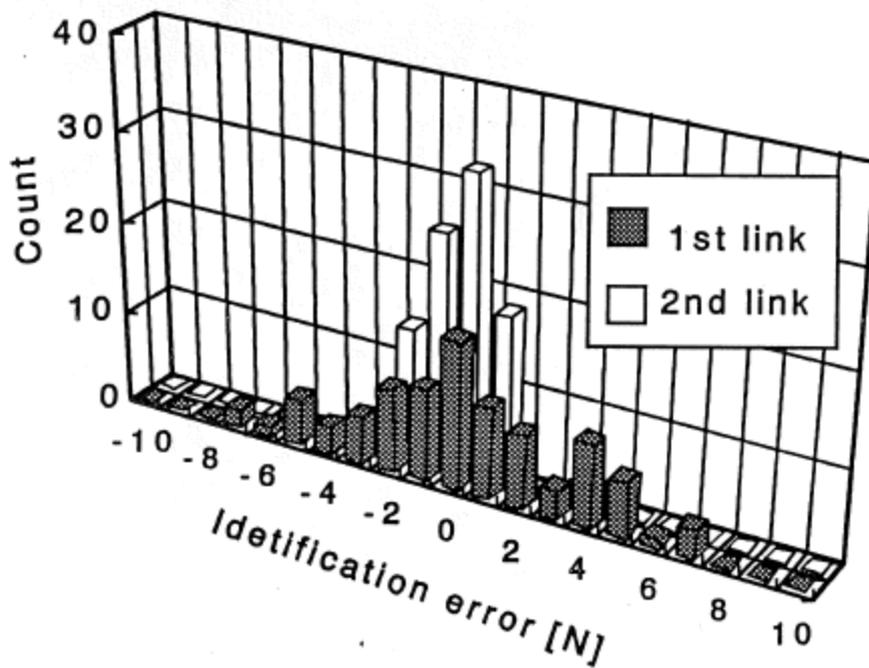


Fig.3-13 Sensitivity of detecting contact forces applied for DD-robot links

過渡的な接触検出の性能として、その接触検出の応答特性(動特性)についても評価を行った。図3-14に示すように、ロボット及び今回提案する外乱オブザーバを含めたシステム全体の応答時間は各軸の接触分解のレベルの5、10Nを前提とすると、各軸それぞれ0.0042、0.0045s程度となり応答時間としても十分な能力が確保できていることを確認した。

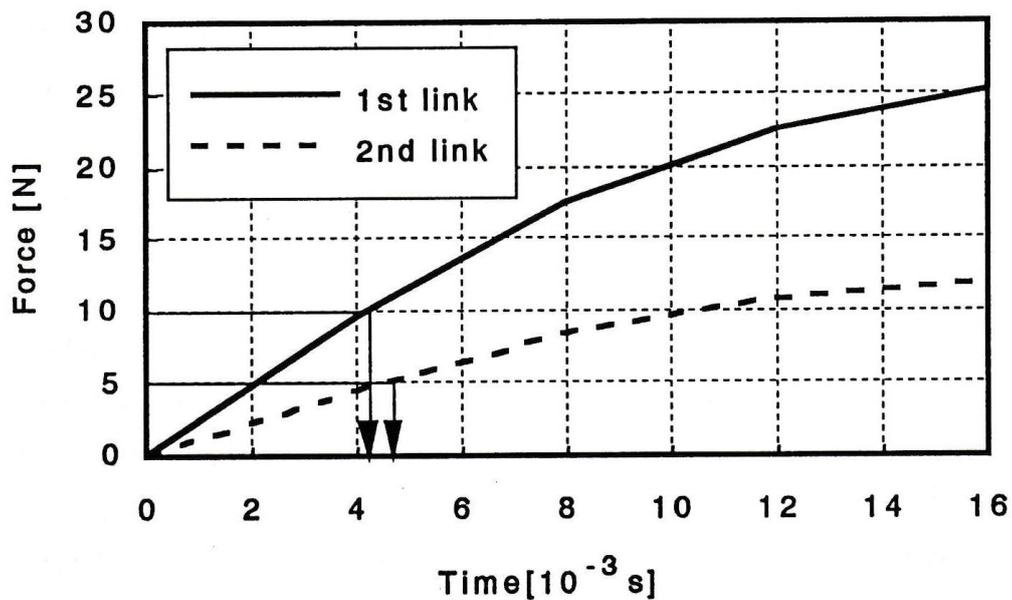


Fig.3-14 Relationship of response time at contact resolution force

3. 2. 4 被覆の厚さと実行可能性の確認

本研究で用いるDDロボットは、物理的な接触が始まってからこれがシステムによって検出されるまでに最大で 0.0045s 程度となる。さらにロボットが実際に停止状態に至るまでに 0.1s を要する。停止動作の間、ロボットは線形減速するので、0.6m/s で動作するロボットの場合には、接触開始から停止までに移動する距離を計算すると

- ・接触検知から停止処理にかかるまでの最大惰走量 $0.0045s \times 0.6m/s = 2.7mm$
- ・停止処理から実際の停止までの最大惰走量 $0.1s \times 0.6m/s \times 0.5 = 30mm$

※等減速度停止

従って、上記の和から被覆の厚さは 33mm 程度を確保する必要がある。この結果はマニピュレータの被覆の厚みとしては実行可能なレベルと考えられる。また、厚みに関しては更に薄くできる可能性がある。これは粘弾性体を被覆に採用することで速度項の影響による接触力も確保できること、人自身の粘弾性効果も期待できる。従って、次節以降の被覆設計とシミュレーション、実際の人との接触実験を踏まえて検証する。

3. 3 ロボットの粘弾性被覆設計

3. 3. 1 粘弾性体被覆への接触シミュレーション

マニピュレータ及びハンドの表面へ柔らかい被覆を適用することによるメリットは多くの報告がされている。衝撃力を緩和すること[86]、接触安定性を示すもの[87]などが従来から指摘されている。システム全体の安定性[88]に関する報告や、接触検出の安定性[82]についても報告されている。

また、粘弾性体をハンドへ提供した事例[89]、柔らか材質の評価を、衝撃力緩和、なじみやすさ繰り返しのあるストレス緩和の3点について行っている[90]。

本研究では接触時の衝撃力を緩和し、かつ接触検出も鋭敏に行うための研究は見いだせない。そこで、被覆の設計は外乱オブザーバを用いたセンサレスの接触検知の性能を踏まえて粘弾性被覆の最適選定を行い、最適な材料の弾性 G_m 、粘性 η_m を求めることを目標とする。

3. 3. 2 接触メカニズム

人との接触現象を記述するために、まず接触メカニズムとして、平面上の柔らかい被覆 (Viscoelastic covering: VEC) に、半楕円体が接触するモデルが一般性を有すると考えた [72][73]。柔らかい被覆として図3-15 に示す Voigt モデルを並列に配置した接触モデルを採用し、人体とロボットの接触部形状をモデル化するために半楕円体を用いた。

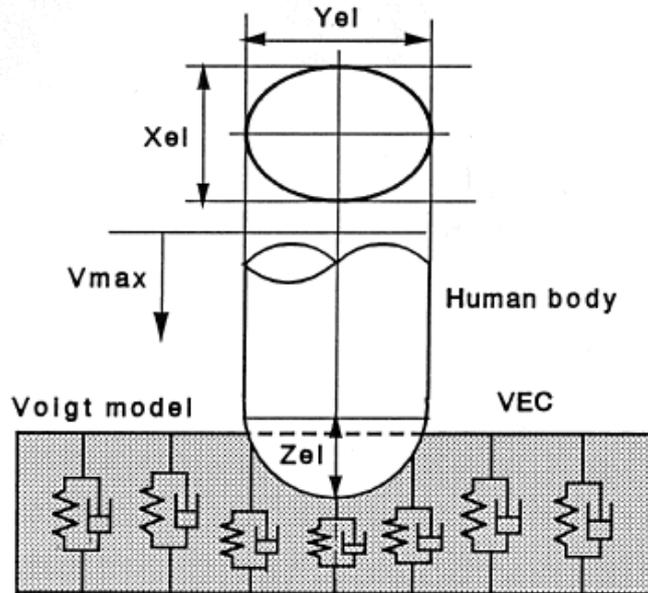


Fig.3-15 Contact mechanism by semi-ellipsoid human model and robot

最も低い痛覚耐性値を示す上腕内側部として図2-3のc部を選定し、半楕円体の最小主軸長は図3-2から、それぞれ実測により、 $X_{el}=48\text{mm}$ 、 $Y_{el}=52\text{mm}$ 、 $Z_{el}=4.3\text{mm}$ と近似的に求められた。接触速度として前述の動作速度 0.6 m/s を与え、これから接触力 $F(t)$ と被覆材料の弾性係数 G 、粘性係数 η の関係を関数 $F(t)$ で表現する。

図3-16に粘弾性体(弾性 G_m 、粘性 η_m) への接触をした場合の接触力の時間変化 $F(t)$ を求めるために、人の接触領域の定数 X_{el} 、 Y_{el} 、 Z_{el} 、接触最大速度 V_{max} とした場合のモデルを示す。

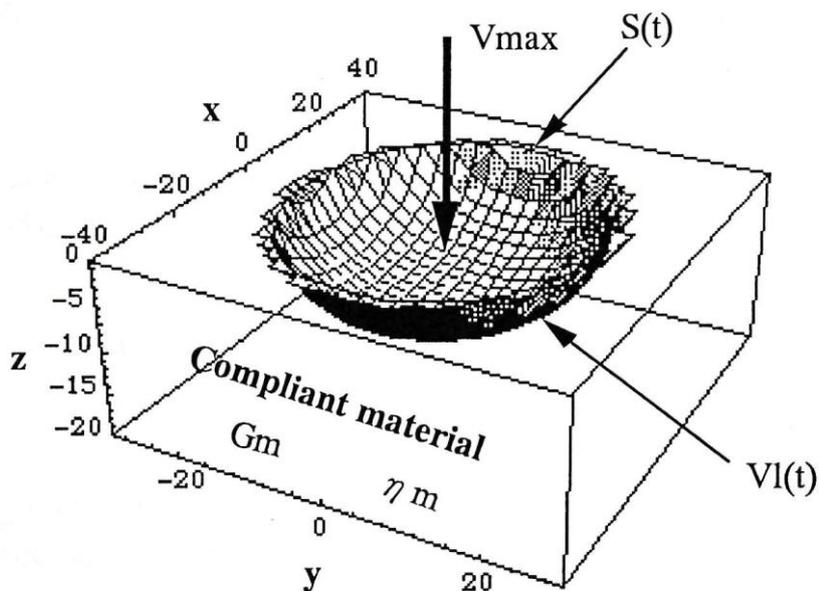


Fig.3-16 Parameter settings for human and VEC contact

接触面積 $S(t)$ については半楕円体の形状から式(3-6)で示される。

$$\frac{x^2}{Xel^2} + \frac{y^2}{Yel^2} + \frac{z^2}{Zel^2} = 1 \quad (3-6)$$

$x=0$ の場合 $y(t)$ は式(3-6)から式(3-7)が導出できる。

$$y(t) = \pm Yel \sqrt{1 - \left(1 - \frac{V_{\max}}{Zel} t\right)^2} \quad (3-7)$$

$y=0$ の場合 $x(t)$ は式(3-6)から式(3-8)が導出できる。

$$x(t) = \pm Xel \sqrt{1 - \left(1 - \frac{V_{\max}}{Zel} t\right)^2} \quad (3-8)$$

従って、接触面積 $S(t)$ は式(3-7)と式(3-8)から式(3-9)のように表現できる。

$$S(t) = \pi x(t) y(t) = \frac{\pi Xel Yel}{Zel^2} V_{\max} t \left(2 Zel - V_{\max} t\right) \quad (3-9)$$

次に、接触している領域について考える。ある接触深さ位置 z における、接触面積 $S(z)$ は式(3-10)のように表現される。

$$S(z) = \pi x y = \pi Xel Yel \left(1 - \frac{z^2}{zel^2}\right) \quad (3-10)$$

接触時の深さを $V_{\max} \times t$ と考えた場合に、その際の接触領域は、粘弾性体の厚みを踏まえて $Zel - (V_{\max} \times t)$ から Zel までとなり、式(3-11)で表現できる。

$$\begin{aligned}
V_i(t) &= \int_{Zel - V_{\max} t}^{Zel} S(z) dz \\
&= \pi X_{el} Y_{el} \left\{ -\frac{Zel}{3} + V_{\max} t + \frac{(Zel - V_{\max} t)^3}{3 Zel^2} \right\}
\end{aligned} \tag{3-11}$$

弾性項による力と粘性項による力をそれぞれ $F_e(t)$ 、 $F_v(t)$ とそれぞれ定義し、発生しうる力 $F(t)$ をその和と考えて式(3-12)で表現できる。

$$\begin{aligned}
F(t) &= F_e(t) + F_v(t) \\
&= \frac{G_m}{Zel} V_i(t) + \frac{\eta_m}{Zel} V_{\max} S(t)
\end{aligned} \tag{3-12}$$

最終的に、式(3-9)と式(3-11)を式(3-12)に当てはめ、 $F(t)$ は式(3-13)にて表現できる。

$$\left. \begin{aligned}
&\text{For } 0 \leq t \leq \frac{Zel}{V_{\max}} \\
&F(t) = \pi X_{el} Y_{el} \frac{G_m}{3} \left[-1 + \frac{3V_{\max} t}{Zel} + \left(1 - \frac{V_{\max} t}{Zel} \right)^3 \right] \\
&\quad + \frac{\pi X_{el} Y_{el} V_{\max}^2 \eta_m t}{Zel^3} (2Zel - V_{\max} t) \\
&\text{For } \frac{Zel}{V_{\max}} \leq t \leq t_{el} \\
&F(t) = \pi X_{el} Y_{el} \left[\left(\frac{2}{3} G_m + \frac{V_{\max}}{Zel} \eta_m \right) + \frac{G_m V_{\max} t}{Zel} \right] \\
&\text{where } t_{el} \text{ is the time of elastic limit}
\end{aligned} \right\} \tag{3-13}$$

図3-17に表3-2で記載される材料定数(弾性係数 G_m 、粘性係数 η_m)を選定し、接触シミュレーションした場合の結果を示す。

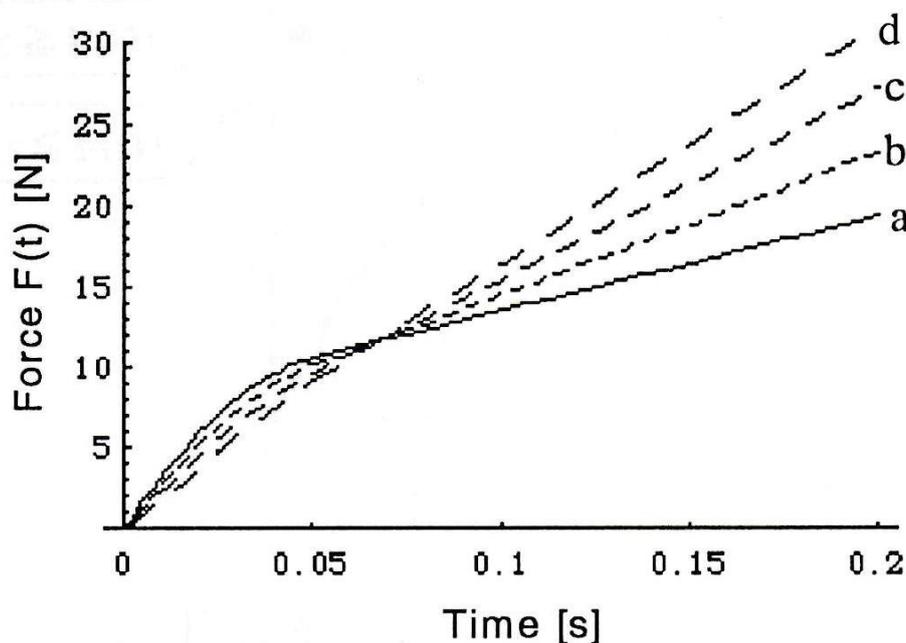


Fig.3-17 Simulated transient characteristics of $F(t)$ by VEC parameters changed

Table3-2. VEC material parameters for simulation condition

	a	b	c	d
G_m [Pa]	2000	3000	4000	5000
η_m [Pa s]	300	250	200	150

3.3.3 粘弾性被覆の材料選定

本研究で対象とする接触現象を相対接近する人側の部位は剛体と考えてモデル化した。これは、機械との接触によって人が痛みを覚える局面が、機械との相対接触が深まって皮膚の剛性が高くなった段階であると考えたことによる。人側も粘弾性体として取り扱う場合には、接触力の立ち上がり部分の勾配がより減少していき、ロボットによる接触検知のタイミングが遅れると考えられる。その段階での接触力は痛覚耐性値と比較して十分に小さいとして対象外とした。

以上の考察に加えて、十分な接触感度と衝撃力の緩和を両方満足するための境界条件は、図3-18で示される関係となる。

- (Step1) calculate the time t_1 in the condition of $F(t_1) \geq F_s$
 (Step2) calculate the G_m and η_m in the condition of $F(t_2) \leq F_c$, at the time $t_2 = t_1 + T_s$

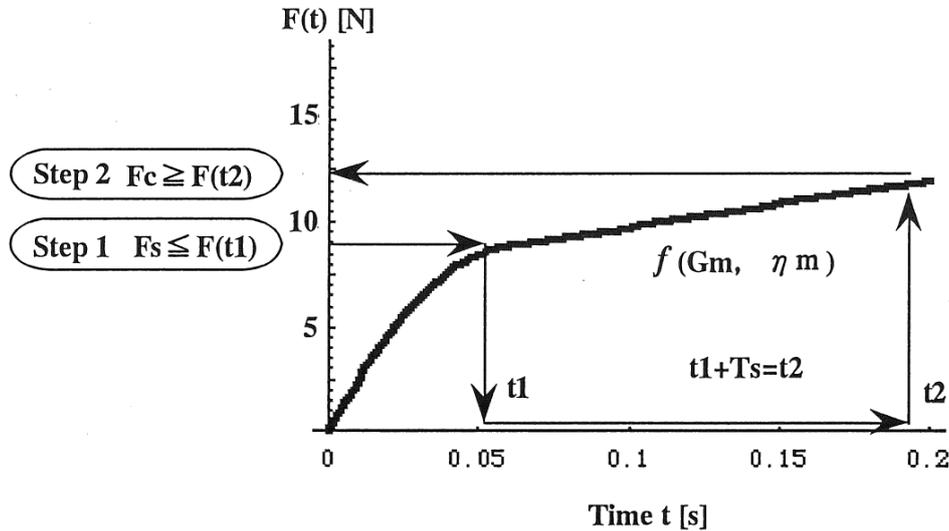


Fig.3-18 Design step for employing optimum VEC for safe human contact

ここで t_1 は接触検出時刻、 t_2 は停止時刻、さらに、 T_s は非常停止に要する時間を表す。まずStep1の流れを以下に示す。3. 2. 3節の結果から各軸の F_s の分解能 $F_{s1} = 10$ N、 $F_{s2} = 5$ N程度となった。この条件に基づき、表3-3の粘弾性係数を式(3-13)へ代入し t_1 を求める。次に、Step2の流れを説明する。今回設定した痛覚耐性値 $F_c = 50$ Nと t_1 に T_s を加えた t_2 、表3-3の粘弾性係数を式(3-13)へ代入し境界条件を明らかにする。

以上の結果を踏まえて G_m と η_m で境界条件を整理したものを図3-19に示す。本研究では、同図ハッチングの境界条件を満たす粘弾性材料の中で、機械的インピーダンスが小さい材料M1(EGR-2)及びM2(HR-80)のウレタンフォームをロボットの被覆として採用した。粘弾性特性から接触初期の速度が高い領域で接触力が高く、接触検出を早くできる。かつ、準静的状態での挟圧力を低く抑えることができる配慮を行った。

Table.3-3 Evaluated practical viscoelastic material parameters

	M1	M2	M3	M4
G_m [Pa]	2794	3260	3870	5053
η_m [Pa s]	520	804	200	63

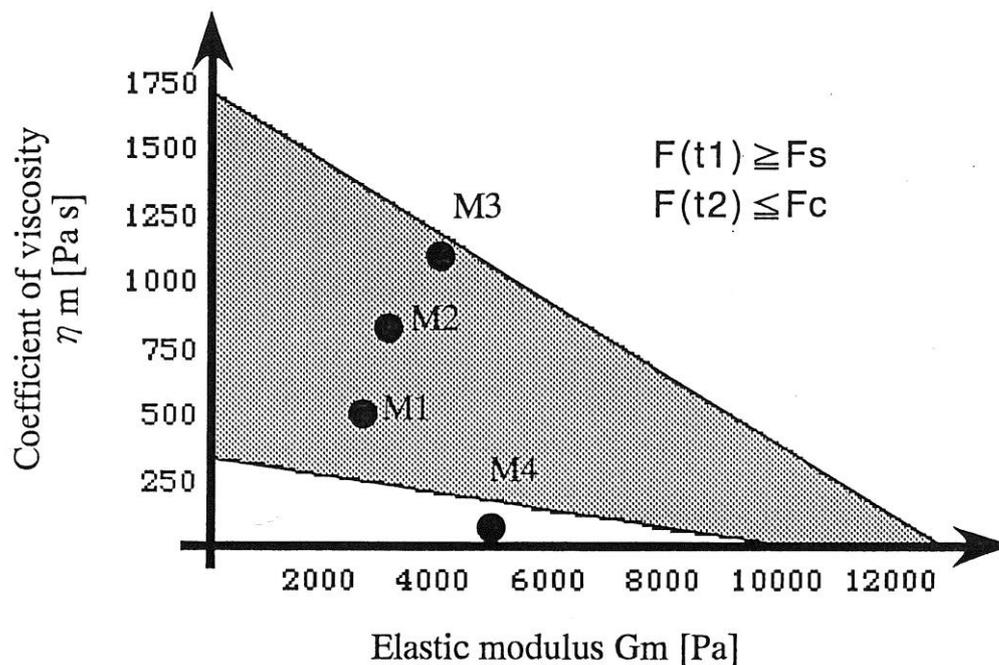


Fig.3-19 Acceptable range relationship between viscoelastic parameters for optimum design and selection of VEC

3. 4 安全なロボットシステム制御

3. 4. 1 安全システム構築の考え方

人との接触について、衝撃力の緩和と接触検出能力の両立ができるロボット表面の被覆の選定のための設計手法を3. 2節で示した。また人との外力検出ができる簡便な方法として外乱オブザーバを利用したセンサレスシステムを3. 3節で示した。実際の生産ラインでの適用を考慮した場合に安全性の確保が必要である。

被覆の安全性確保については、表皮の経年劣化や使用に伴う損傷などが推定されるが、使用開始前に点検することを前提に進める。残るリスクとしては制御システムの故障による非安全側の動作となる。一般的には制御システムの故障モードを分析したうえで、フェイルセーフなシステムで構成することが要求されている。

3. 4. 2 外力検出の2重化

制御に対する信頼性要求レベルとしてカテゴリ3以上が要求されるが、適用範囲を広く考えカテゴリ4で構成する方針とした。ロボットの外乱オブザーバの計算過程を異なる2つのCPUで計算することで比較する方法も想定されるが、CPUの故障モードが複雑なため信頼性実証が困難となる。

そこで、本研究ではより確実な方法として①外乱オブザーバを構成する CPU に対して、2 リンクマニピュレータの動的な振る舞いと同一②電氣的な等価回路を設置した。この②で構成される回路からのアナログ出力と①のからのデジタル出力をアナログ変換した値と物理的に比較する方法を考案した[91][92]。

まず、①に関しては3. 3節から外乱オブザーバで計算された外力推定を出力するシステムを構成する。図3-20に示すように推定される外力は、痛覚耐性値 F_c を設定したウインドコンパレータ(Failure-to-safety window comparator: FSWC)に入力され、外力を超えると非常停止が動作される構成とした。ここでウインドコンパレータは日本信号製のカテゴリ4対応のファームウェア型式 FS49A を採用した。

本システムの特長はシステム全体がフェイルセーフで構成されていることである。外乱オブザーバを構成するしくみは、すべてが正しい処理、動作をしているときのみ許可をする安全確認型の設計手法を踏襲している。

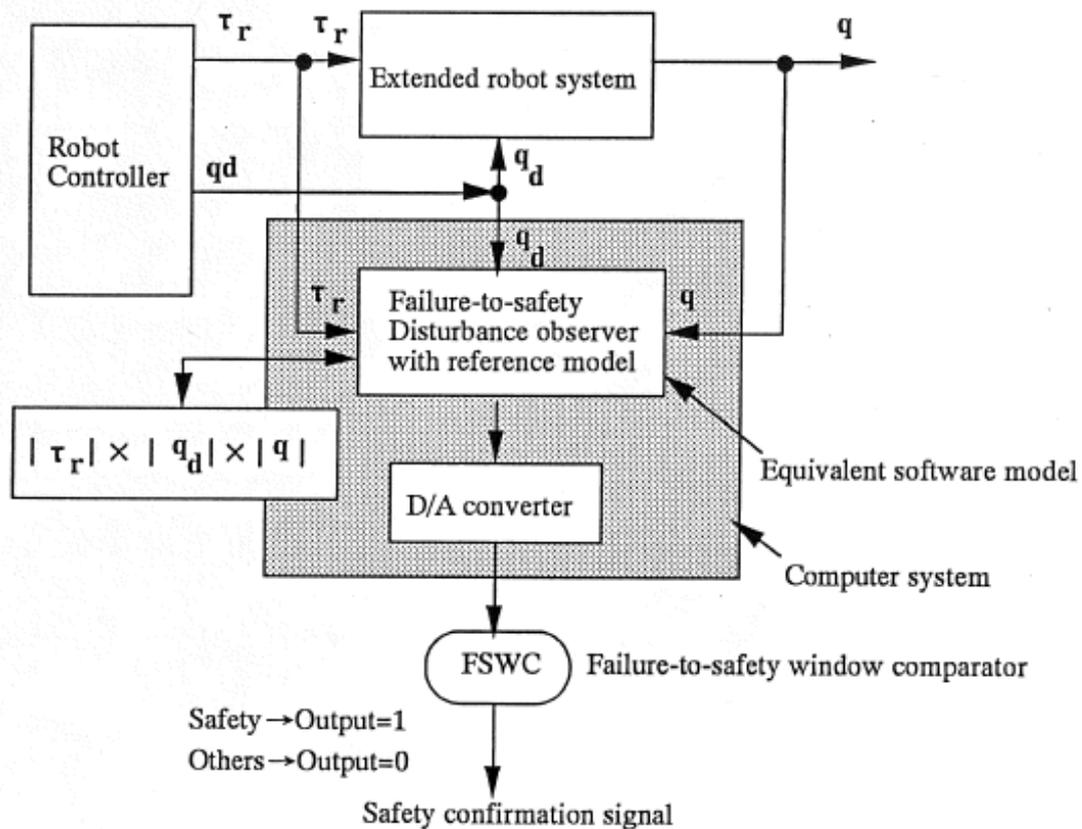


Fig.3-20 Block diagram of sensor-less detection control with viscoelastic covering

次に、図3-21に示すように、②の出力に関してはロボットの動的な機械的振る舞いと等価な電気回路を構成し①の出力と同じくウインドコンパレータに出力した。

本システムはカテゴリ4を満足するために故障モードが短絡または断線となる電気素子で構成している。構成している部品などが故障した場合はフェイルセーフ動作するようにシス

テム全体が構成されている。また、アナログ回路で構成することで安全検出に必要な時間も短縮できる特長を有する。

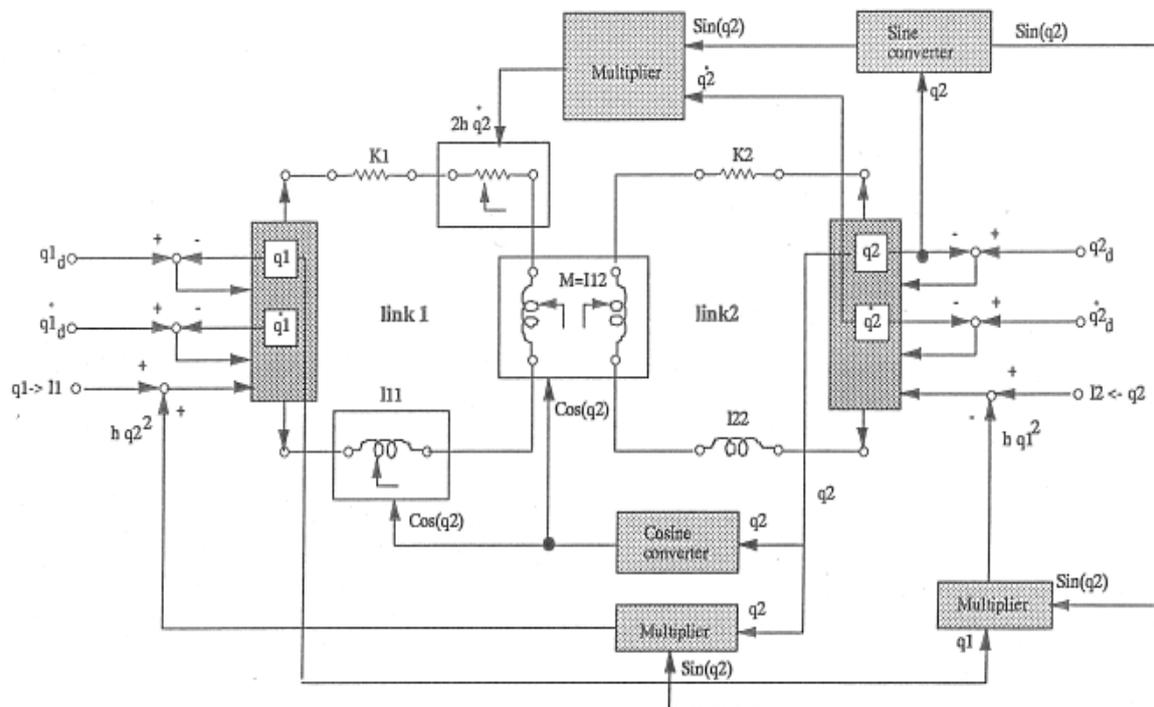


Fig.3-21 Safe contact detection and stop capabilities system with equivalent circuit for two-links DD manipulator

3. 4. 3 安全な接触検知システムの全体構成

ロボットによる接触検出から停止制御までを、フェイルセーフに実現するシステムとして構築した。外乱オブザーバは、ロボットシステムが自分の動きを正常動作しているかを内部モデルとして把握していることを意味する。正常に動作しているときに許可信号を出す構成となり、安全確認型のセンシングシステムが構成できる。人との接触による過大な接触トルクの観測についてフェイルセーフ機能を有する比較器 (FSWC) [93] によって監視を行う。そのうえで、ロボットの動作許可を与える構成にしている。

また、より高い安全確保のために、多重化を考慮した異常監視方法を本システムに適用した。多重化した信号としては1. 接触監視、2. システム異常、3. 速度監視、4. インターロックなどの外部入力とした。

それぞれの信号は AND ゲート (Failure-to-safety AND-gate: FSAG) に入力され安全監視と停止制御が実行される構成となっている。FSAG はカテゴリ4で動作、判定するフェイルセーフ機能を有する日本信号製のファームウェアを採用した。型式はFSWCと同じくFS49Aである。接続方法でFSWC、FSAGの両方に対応できることが特長のフェイルセーフ素子と

なる。FSAG からの安全出力はロボットシステムの非常停止 (Emergency-stop: EMG-stop) へ入力される構成とした。これらの全体システムの構成を図3-22に示す。

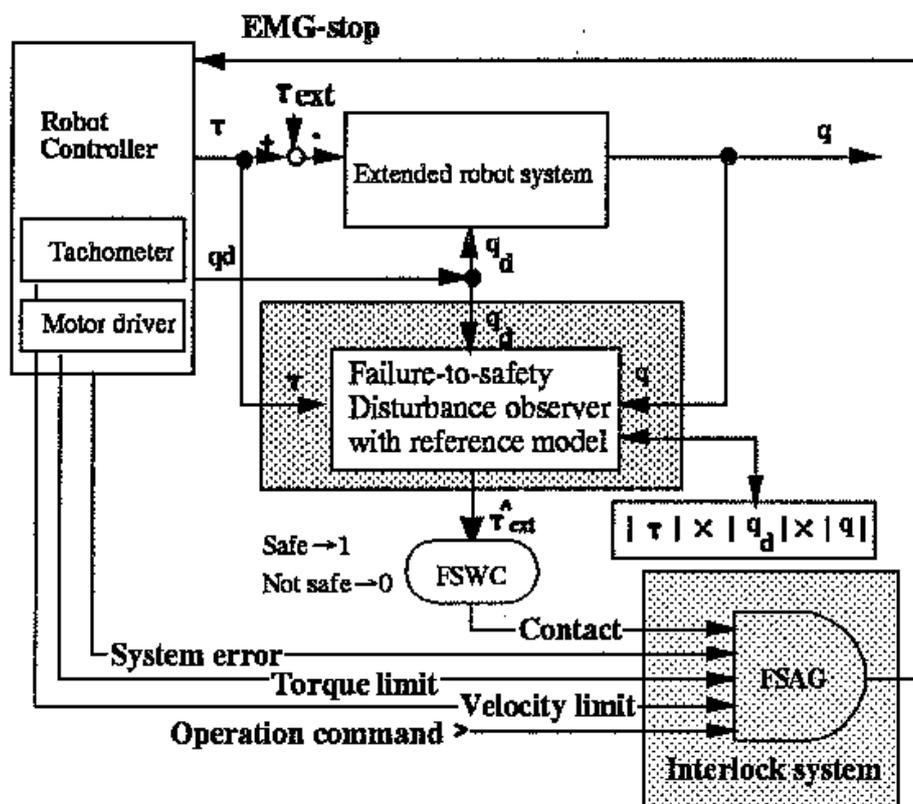


Fig3-22 Block diagram of the disturbance observer for contact detection and emergency stopping by analog model reference control

3.5 協働作業を想定した安全性評価

3.5.1 粘弾性被覆を採用したセンサレス接触検知特性

今回採用したDDマニピュレータに粘弾性被覆を装着し、センサレスで接触検知ができるロボットシステムを示す(図3-23)。

今回選定した粘弾性被覆 M1(ピンク色の素材)を第1リンクの先端部と第2リンクに装着した。また、同じく選定した粘弾性被覆 M2(白色の素材)を第1リンクの根元部に装着した。スカラ型ロボットであるので、動作方向に対応した面のみに装着している。また、被覆の交換を簡便に行えるようにリング形状とし、アームにはめ込む構造とした。

接触実験に当たっては、巻き込まれやアーム間のせん断が発生しないように機械的な動作制限を付加した。

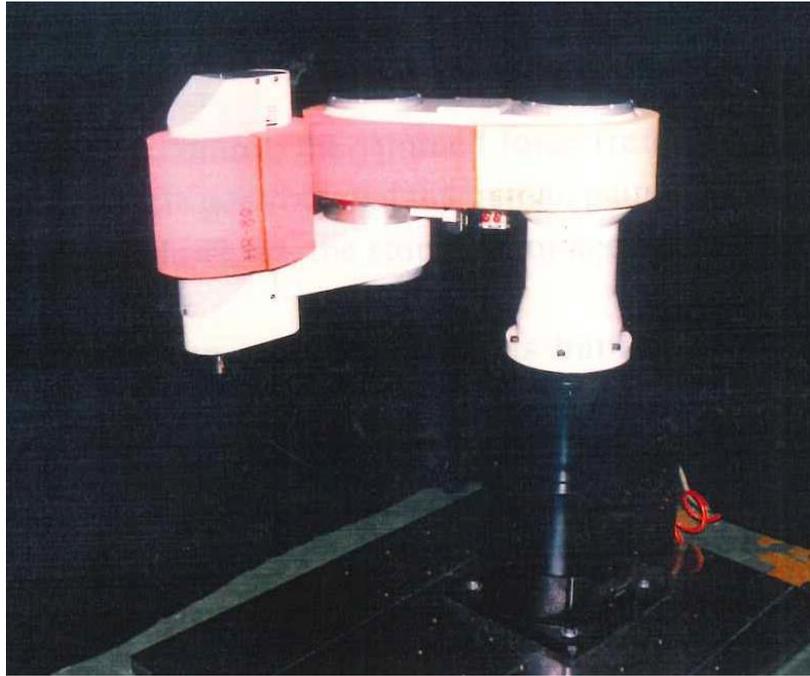


Fig.3-23 Photograph of proposed robot manipulator system with viscoelastic covering

人とロボットの安全な接触を確認する前に、接触位置による影響を事前に検証することとした。図3-24に開発したロボットシステムの人接触との検証のためのシミュレーション条件を示す。アームの接触位置についてセンシティブリティを考慮してAc、Bc、Ccの三か所を選定した。

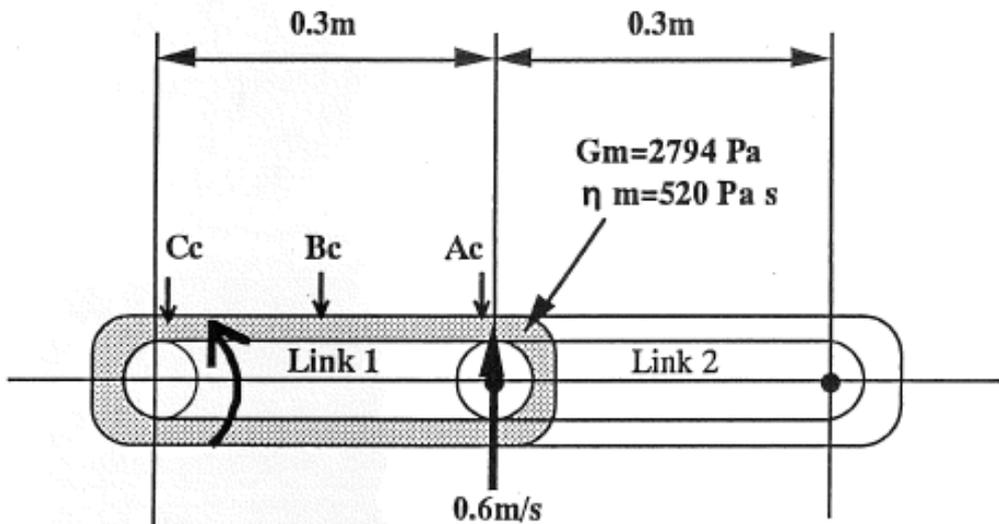


Fig.3-24 Simulation condition for human and robot transient and quasi-contact at robot manipulator link1 of Ac, Bc and Cc

図3-25に選定した3か所での接触力を接触検出と停止制御の有無でシミュレーションした結果を示す。比較のために、これまでの議論に基づいたシミュレーションの結果もプロッ

トした。実験モデルとしては、3. 3. 2節において記述した接触モデルを利用し、その中で人側は剛体とみなしその接触部楕円体として取り扱った。

この結果、接触位置Ac、Bc、Ccのそれぞれで25N、20N、14Nとなった。Acの位置が最も停止までの接触力が大きいことが判明した。

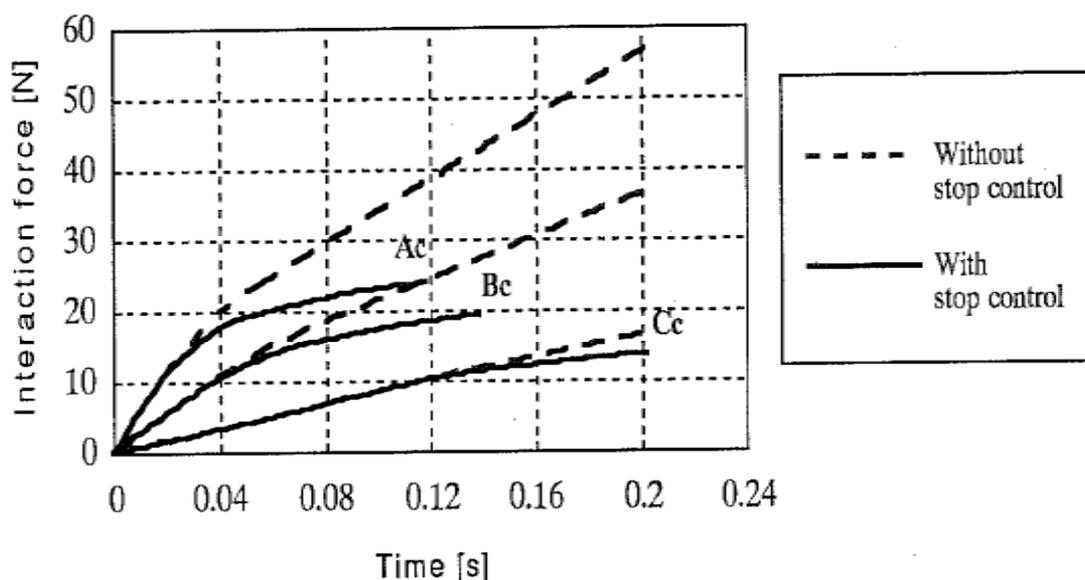


Fig.3-25 Simulation results for safe human robot contact detection and stop capabilities in condition of transient and quasi-contact at Ac, Bc and Cc

3. 5. 2 人との接触検知と停止実験

安全確保が最も困難な条件、すなわちDDロボットの第1(根元側)ジョイント近傍で実際に接触実験を行ったときの $F(t)$ の時間変化をモニタすることによって、提案するシステムの有効性を評価した。評価実験の様子を図3-26に示す。

実験対象として人側は、痛覚耐性評価実験の結果、最も痛みを覚えやすいことか示された上腕内側部である図2-3のc部を採用した。その際、上腕部は、衝突部を挟むロボットと反対側に固定壁を置き、衝突時の接触力に伴う腕の反対方向への運動を防止する形で行った。

ロボットと接触する部位の粘弾性定数は、図3-20に示す粘弾性被覆の種類として選定したMI=ウレタンフォーム(EGR-2)のもの、 $G_m=2794[\text{Pa}]$ 、 $\eta_m=520[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ である。

被験者は男女あわせて12名で実施。年齢は18歳から63歳の範囲である。恐怖心を下げするために、最初は50 mm/s程度からスタートし最大で400 mm/s程度まで評価した。どの接触実験においても安全な接触検出と停止が確認できた。



Fig.3-26 Photograph of practical experiment for safe human contact

この実験結果の一例を図3-27に示す。安全制御機能を無効にした場合はロボットが計画した目標位置まで動作を継続し、挟圧力が増大することが確認できる。

開発した安全制御手法を採用した場合は痛覚耐性値 $F_c=50\text{N}$ に対して、安全な接触検知と停止制御が動作する。実際に発生する接触力は 20N 程度となり、設計要件を十分満足するシステムとして実現されていることが明らかとなった。

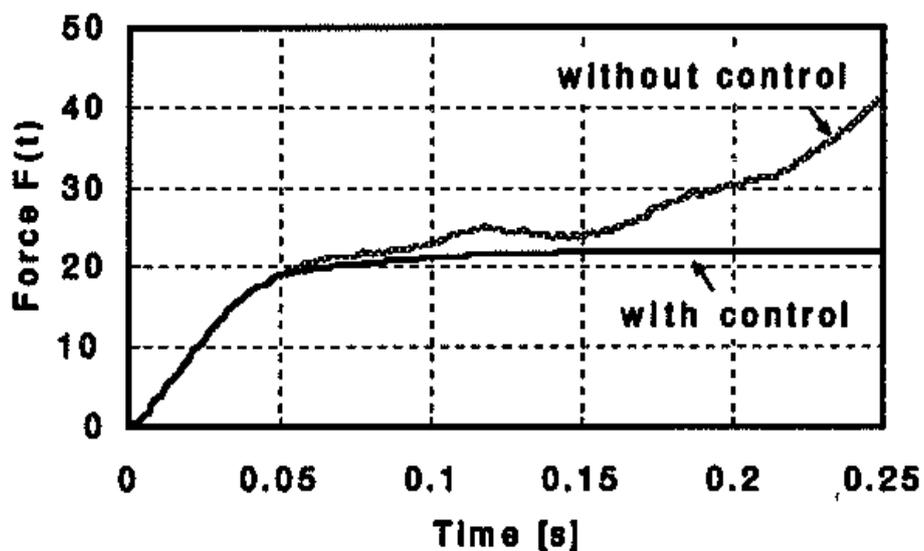


Fig.3-27 Evaluation and result of transient and quasi-contact force for developed safe coexistence and collaboration robot system

3.6 安全な接触検出と停止制御システムの検証とまとめ

3.6.1 提案システムの検証結果

本研究では、共存・協働作業において、ロボットに対する人の予防安全技術として工学的な観点から痛覚耐性値を求め、これに基づいてロボットシステムを構築するという安全最優先の設計手順の重要性を主張した。以下に、本研究で行った結果と得られた知見を要約する。

- (1) 人とロボットが隣り合う共存・協働状態で作業する状況において、どのようなリスクが存在するかを解析した。人とロボットの接触面積に着眼し、安全サイドでの判断をするためにその接触最小面積を示した。
- (2) 一般的な共存・協働作業を想定し、人とロボットの柔らかさに着眼することで、求めた接触最小面積から痛覚耐性値を 50N と本研究では定めた。
- (3) 外乱オブザーバを用いることによって、ロボットシステムが自らの正常動作を監視し、人との接触検知について外界センサを用いることなく安全で高信頼性を確保できる検知技術システムであることを示した。
- (4) 痛覚耐性値をベースとして、人とロボットの接触時でも安全空間を脅かさないシステム設計方法を示した。人とロボットの機械的インピーダンスマッチング問題として、接触検知を高速に行うことかできるように、ロボットを柔らかい被覆で覆うための設計指針を明らかにした。粘弾性の最適化を行い、選定したウレタンフォームの有効性を示した。
- (5) 接触時の非常停止命令に従ってフェイルセーフに停止動作に移行する多相式異常監視機能付きのロボットシステムを構築し、その安全性を接触力で評価した結果、痛覚耐性値より低い接触力の段階で早期にロボットが停止できることを検証した。また、その有効性を示した。

3.6.2 今後の展望～観測すべき物理量

今回の実験結果で想定よりも低い接触力で停止できた理由を考察する。これは人を剛体と考えて接触実験をしたが、人側にも機械的インピーダンスがあり、接触力が緩和されることが推察される。接触部位を限定する、もしくは人側の機械的インピーダンスを保護具などで確保することで接触力をさらに低くできる。

また、被覆の厚さをより薄くすることで利便性や適用性を上げる必要性も想定される。適用可能な共存作業分野をさらに拡大して行く上には、様々な人の接触部位が想定されるようになるため、非常停止時間の改善として短縮化を図る、あるいは想定局面に応じてロボットの動作上限速度 V_c をさらに制限する必要があると考えられる。

痛覚耐性の部位依存性をさらに詳細に観察することによって、より適切に人とロボット両者の機械インピーダンスの影響をとらえた厳密な解析が議論できるものと考えられる。

また、非接触段階の安全確保技術の検討およびその本研究との統合も、今後の研究の方向性として重要と考える。非接触時のロボットの動作が人に及ぼす心理的ダメージの評価や、高い信頼性を持つ視覚センシング情報の統合的な活用を検討して行く必要がある。

さらに、人との共存・協働という観点から、人側の反応動作を考慮に入れ、より知的にロボットを危険回避させる制御への展開を図る研究も重要であると考えている。

本研究は力を制御するために、人とロボットの機械的インピーダンスマッチング問題としてとらえ、簡便で安全な制御システムを提案した。何を物理量として人との物理的インタラクション制御をすべきかという課題に対しては多くの研究アプローチが行われている。

接触力だけでなく衝突現象に着眼し、エネルギー密度を利用して接触時の重篤度との関連性を分析 [60][61]に関する報告がある。また、衝撃のストレスと関連する皮膚の損傷を調査するため衝突の重篤度を見積もる方法を拡張した報告 [62]がある。人とロボットの相互作用におけるロボット設計の安全基準に着眼し、衝撃による打撲耐性を評価するために、最大衝撃力を単位接触面積あたりに換算した平均接触圧力と総移動エネルギーに関わる研究 [63][64]などがある。

力、力積、エネルギーなどの観点で評価するためには人の耐性感覚がどれに効くのかをより見極める必要がある。人は変位量と変形速度に反応するセンサが皮膚表層にあることを踏まえると力で記述する方がより正確に制御でき、簡便なやりかたとしては力積、またはエネルギーであると考えられる。これらの記述や制御方式は人の痛覚検知のしくみとあわせて行うべきであり、さらなる考察が必要である。

3. 6. 3 今後の展望～ロボットの制御方法

安全性と生産性の更なる高度な両立に向けて、最後の砦となりうることと簡便なしくみで提供できるように接触規範の安全制御を提案した。より大きなものをよりはやく運びたい、作業させたい場合は接触する前に止める、減速する、回避するなどの制御が有効と考える。

電氣的なハード回路は温度変化の影響や複雑なマニピュレータの振る舞いを電気回路で構成することに課題がある。規格の動向としても広く展開するために安全要求レベルをカテゴリ3/PL=dとすることがISOの規格で定められた。また、論理的な安全からより社会的な受益を考え確率的な安全を選択する動きがある。

ブレーキなどの経時変化するものも日常点検などで対応することとした。近年ではIoT技術などで長い期間のモニタリングで経年劣化などの劣化や故障の検出を人に完全に依存することなく検出、傾向管理することでより高い安全性の確保が期待され、更なる考察が必要である。

3.6.4 まとめ

第二の S-RQ としてモノづくりにおいて、その許されたふれあいの範囲内で自律性を持って作業を助け合うことができるか？との問いに設定した。学術的研究課題として、その感覚を取り込んだロボットシステムが選定したアラート指標に従い、自律性を持って人との安全な接触検出と停止が可能であることを明らかにした。

第3章では第二の S-RQ に対して安全基準を踏まえた共存・協働ロボットシステムについて述べた。研究テーマとアプローチとして、①人とロボットの接触問題の明確化～衝撃力と挟圧力緩和、②人とロボットの機械的インピーダンスマッチング問題として安全な接触と停止機能が実現できることを示した。

具体的な設計手法を明示し、市販の産業ロボットに開発したシステムを織り込んだ。設定した痛覚耐性値 $F_c=50\text{N}$ に対して、 20N 以下の接触力で安全な接触検知と停止が実現できることを示した。学術成果は研究業績目録の業績(2)(3)に対応する。

さらに、③人の耐性感覚を取り込んだ安全なロボットシステムの構築についても、産業応用に資するフェイルセーフ回路を設計、開発し、安全性が確保できることを示した。学術成果は研究業績目録の業績(4)(5)に対応する。

¶ 倫理規定への対応

本章の人間工学実験に関して測定の実施場所である豊田工業大学大学院において、(1)目的の適正さ、(2)方法の適正さ、(3)安全性の確保、(4)被験者からの同意取得を得て、人を対象とする実験が行われた。

第4章 安全な人との共存・協働ロボットシステムの実生産ラインへの適用

4.1 社会的要請と産業応用展開

4.1.1 共存・協働化のための安全規格整備状況

人とロボットシステムが協調して新たな生産性を切り拓く時代に向けて、共存・協働作業の安全性確保、確実なリスクアセスメントの実施が必要である[29]。また、これに対応したロボット及びその周辺機器、システム化、知能化、それらを統合する技術開発が活性化されることが社会から強く期待されている。共存・協働化における安全規格とその取り組み活動の流れを振り返ると、日本国内では世界的な動向を正しく捉え、かつ的確な動きを取って来ている。具体的には国内の通達では共存・協働化の安全基準を国際規格の発行予定を踏まえた留意事項として規定し、いち早く発行されている[94][95]。

その後のロボット安全規格の制定動向として、ISO/TC299/WG3 を中心に整備が進み2011年にロボット及びそのシステムの安全規格[7][8]、2016年には協働ロボットの安全規格[18]が体系的に規格化されてきた。また、人とロボットの協調安全の考え方についても多くの提案[96]が出てきている。これらのしくみの整備を整理したものを図4-1に示す。

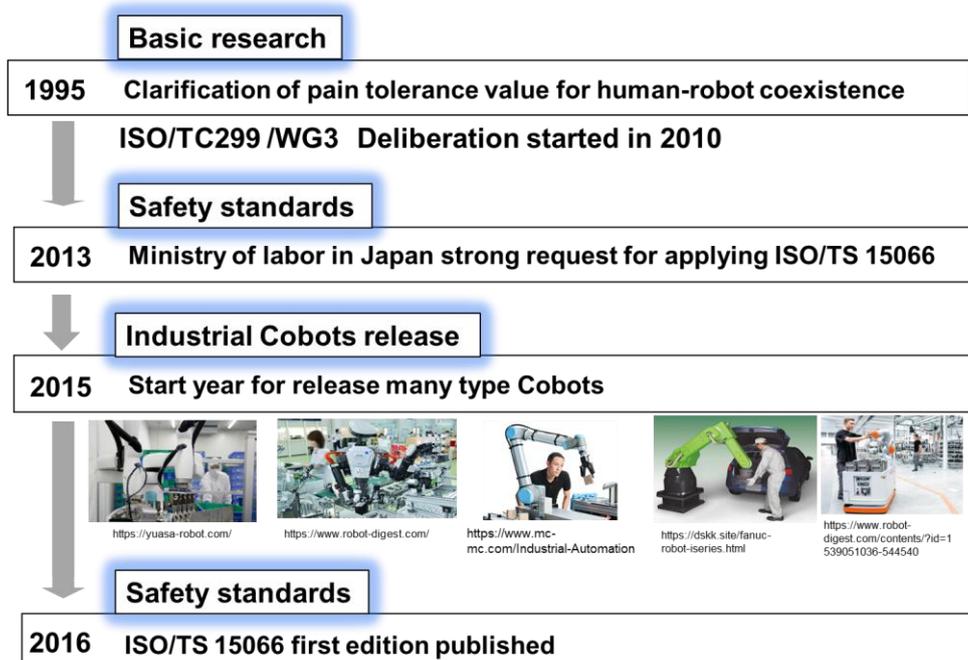


Fig.4-1 Establishing for safe coexistence and collaboration with industrial robot

4.1.2 共存・協働化の実証アプローチ

ユーザが協働ロボットを導入する際に必要な安全性検討プロセスと安全規格の関係をまとめた一例[97]を図4-2に示す。共存・協働化における安全確認ステップはユーザが慎重に適用毎の特性を踏まえて行い、かつ技術蓄積と実績を着実に積んでいく活動と捉えている。

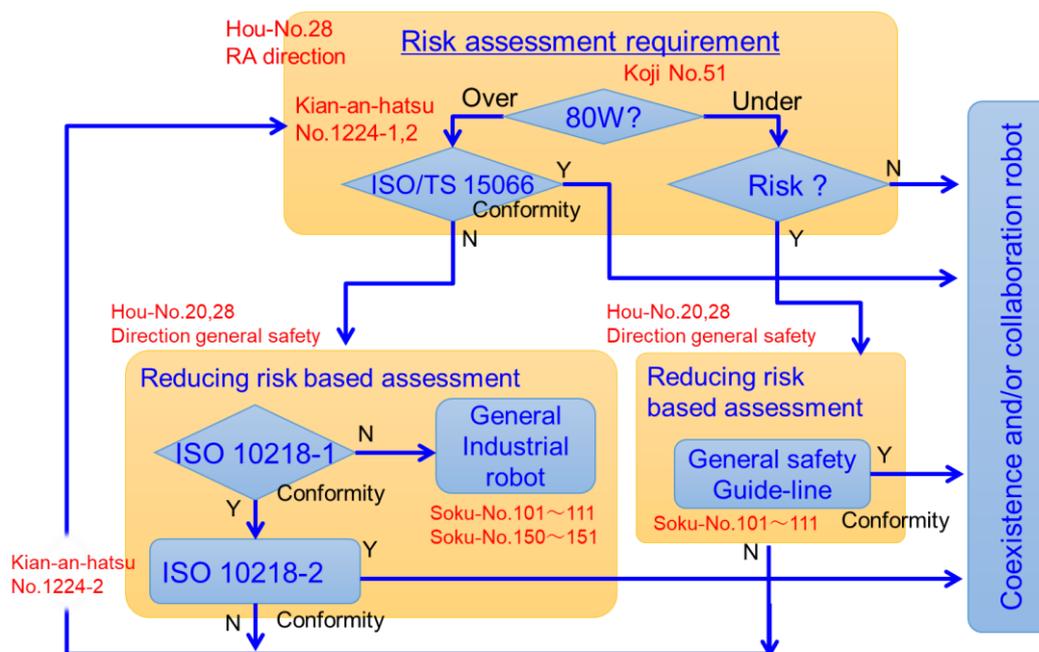


Fig.4-2 Risk assessment flowchart with international and Japan domestic regulations

作業安全を確認・確保し、実行レベルを上げ、本質安全の追求とより高い生産性に向け、人とロボットが協調したモノづくりを実現することはまさに共存・協働化と安全のテーマとして中長期的に取り組むテーマと考えている。

本章では、第三の S-RQ としてモノづくりにおいて実現できたしくみや手段が実際の社会に定着でき、有効性を示すことができるのか？という問いを検討する。学術的研究課題として実際の生産ラインで安全性確保と助け合いによる生産性向上が両立できることを実証し、その成果を明らかにすることとする。

安全な人との共存・協働ロボットシステムの実生産ラインへの適用について各節での研究テーマと対策を記述する。

- ① 社会定着のための安全検証と評価のしくみ構築と整備
- ② モノづくりにおける自動、共存・協働の特長を活かした人とロボットの作業分担計画
- ③ 実ラインでの安全性と生産性両立の実証

なお、本章の学術成果は研究業績目録の業績(6)に対応する。

4.2 実用化に向けてのステップ

4.2.1 モノづくり分野における背景と共存・協働化

今後のモノづくり分野において少子高齢化や、お客様ニーズの多様化があげられる。少子高齢化については、1章でも述べた通り、各国の高齢化率の推移からわかるように、日本は突出して高齢化が先行かつ急激に進行しており、各国がこれに続く構図となっている。我々が先陣をきってこの問題解決に取り組む必要があると認識している。少子高齢化の影響により労働者の多様化が拡大し、製造現場では作業能力の低下および人による作業能力のばらつき拡大といった問題がある。この対応として、誰もが働きやすく、生産性を改善するためには、負担感がある作業の低減が課題と考えている。

自動車製造におけるモノづくりにおいて、お客様ニーズの多様化については1章で記述した通り、従来はエンジン車のみであったが、近年はハイブリッド(HV)車、燃料電池車など幅広い車が増加傾向であり、多量少品種生産から少量多品種生産への対応が重要となる。このため、汎用化、移設・再配置が簡単な設備、人作業の付加価値向上をセットで行い、柔軟な工程づくりをする必要がある。

モノづくり分野への共存・協働作業の適用工程を考察するにあたり、モノづくり分野の代表事例として、自動車製造のプロセスに着眼する。図4-3に示すように自動車の製造プロセスはエンジンやHV構成システムに代表されるユニット系とそれぞれの部品を組付けて完成車状態にする車両系の工程に大別される。

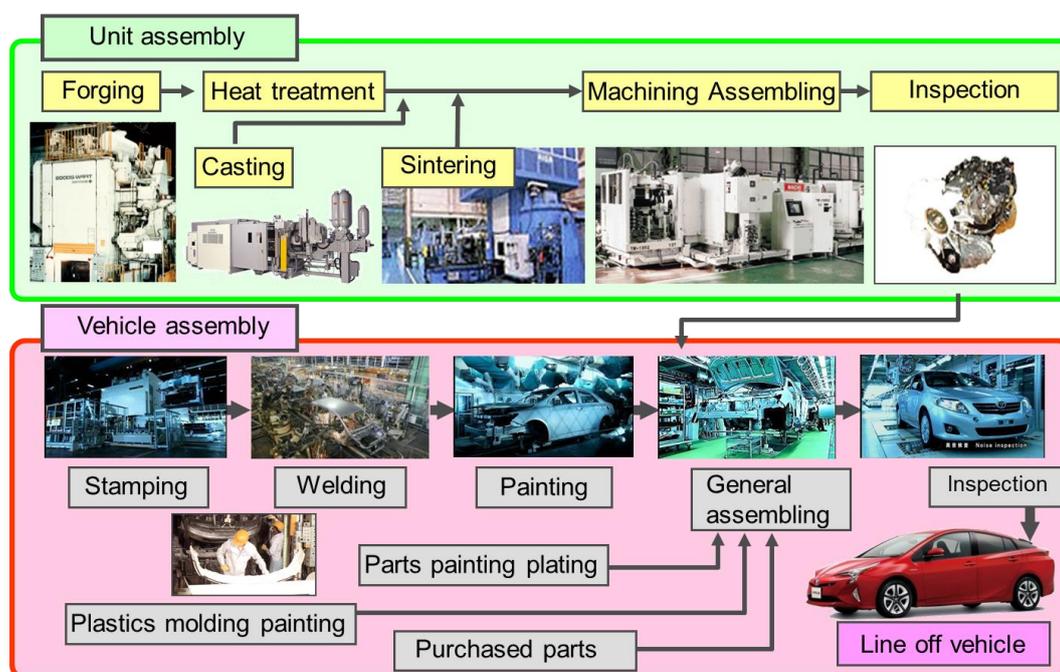


Fig.4-3 Automobile production process for unit and vehicle assembly as an example of Toyota motor corp.

各工程を分析すると、汎用化が容易で生産量も確保でき自動化が適合する工程と汎用化が困難な工程、技能が必要な工程が存在する。どの工程でも人の力が必要となるが、その比率が高い工程は労働集約型の工程編成をする場合が多い。

車両系の組み立てを例とした場合、鋼板のプレス、ボデーの溶接、塗装の工程は自動化が比較的適合しやすいが、各工程の仕上、組立・検査工程では技能が必要な作業が多くあり、人作業で対応している状況である。図4-4に示す各工程の自動化はロボットの採用状況から考察すると、ボデー組付けのスポット溶接工程、ボデーおよび駆動部品のアーク溶接工程が7割程度となる。残りは塗装工程や鋳造、鍛造工程における重量物のハンドリング工程へ主に採用されている。内装品などの傷がつきやすい部品、ワイヤーハーネス(W/H)などの柔らかい部品を扱っている労働集約型の工程への適用が期待される。

人では対応できない、もしくは困難な作業を中心に産業用ロボット開発と適用が行われ、実行可能な領域へ先人が適用してきた。今後は、ロボティクス技術だけでは従来では適用困難とされてきた領域を、人とロボットが共存・協働化することで助け合い、作業分担する新しいモノづくりが期待される。

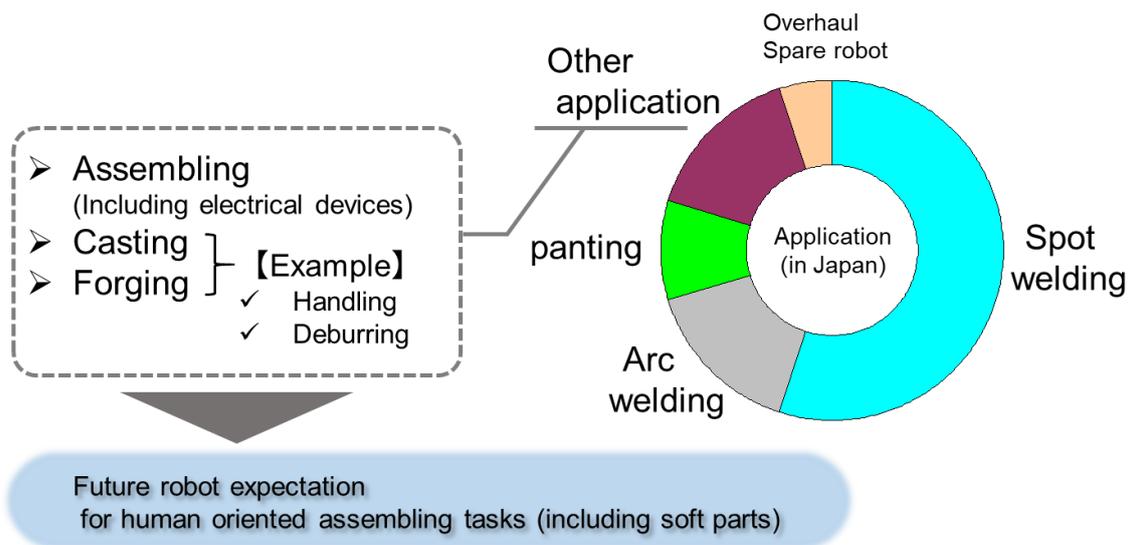


Fig.4-4 Typical industrial robot system application for automobile manufacturing as an example of Toyota motor corp.

4. 2. 2 自動車製造における共存・協働適用工程の検討と要件

自動化と協働化の間には共存化という遷移状態が存在する。自動化、共存化、協働化の違いとそれぞれの特徴を図4-5に示す。一例として、人とロボットがワンペアで作業実行するケースで述べる。

自動化の場合は人が柵の外、または安全エリア監視されている領域で作業を行い、あるタイミングでワークを人もしくは搬送機などで自動工程へセットが想定される。この場合付加価値の無い搬送作業が発生する。

より高い生産性を想定した場合に共存化できると、人とロボットの作業が近接化され、搬送作業は廃止もしくは削減が可能となる。また、従来、空間的に離れていた作業が並行処理することが可能となる。さらに協働化されると、同じワークスペース上での作業が可能となり連携性の高い人とロボットとの協調作業が実現できる。人とロボットの作業分担にも自由度ができることから、生産量、生産種類の変動にも柔軟に対応できることが特徴となる。レイアウトの自由度向上、スペースミニマム化を通して、人とモノのアクセス経路の最適化が実現できるなど多くのメリットが期待される。

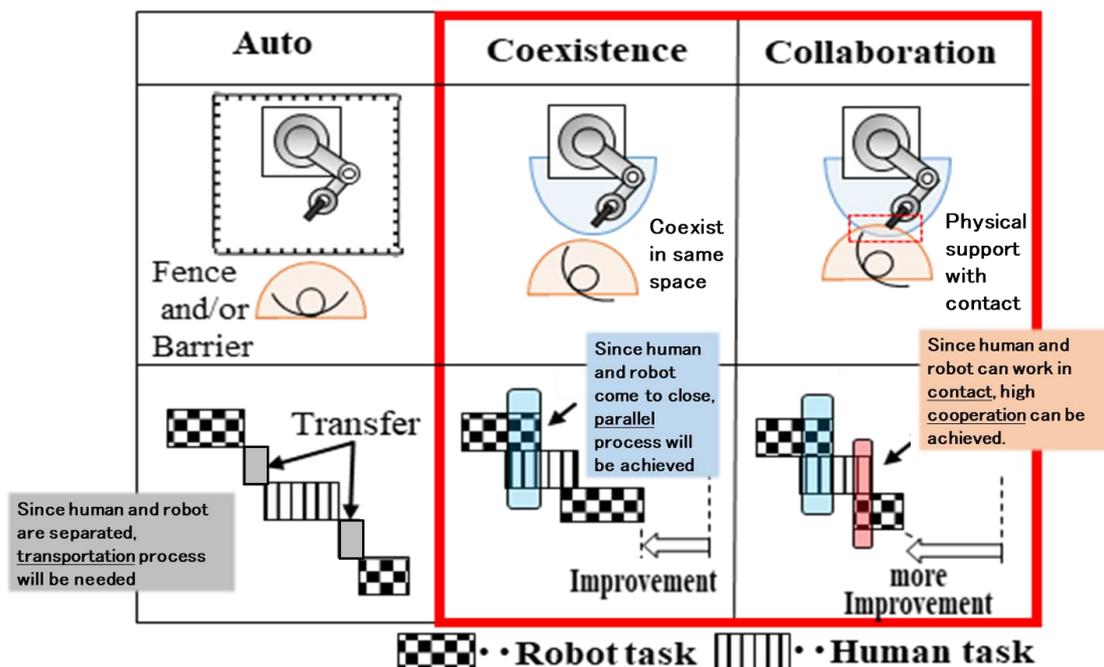


Fig.4-5 Advantages for human robot coexistence and collaboration

比較的早い段階で、新しいモノづくりへのチャレンジとして、人とロボットの共存に着眼し、研究機関との連携[92]、実際の適用事例が報告されている[22]。

2015年から多くの協働ロボットがリリースされ、産業界の中で広く適用、活用される事例が報告されている[10]。産業ロボットの一般的な活用方法を人とロボットの関わり方で整理したものを図4-6に示す。人とロボットの作業領域、双方の作業領域のラップとタイミング、そして直接的な接触をともなう作業点の有無の観点で整理した。

市場の適用状況を見てみると、挟まれ時のリスク低減対策が難しいケースが多く、リスクとベネフィットの関係で自動化、共存化、もしくは人作業を選定しているケースが多いと推察される。協働ロボットをスペース確保、レイアウト自由度向上などを目的に柵の無い自動化、共存化として活用する報告例が多い。

①自動の場合は人とロボットの作業領域は分離される。機械的な安全柵だけでなく、電氣的なエリアセンサなどで隔離するケースも自動、もしくは柵なし自動と位置づけされる。自

動化の特徴として、人とロボットの作業を空間的に分離することで高速で動く作業、重量物の取り扱い作業、熱源や有機溶剤など人体へのリスク回避と生産性を両立できる特長がある。しかしながら、自動化が困難な作業が工程順序の中で存在すると、自動化の成立困難となる。また、空間的にはロボットと作業者の動作場所が別々に配置する必要が生じる。このため、自動化工程と人作業の工程との間に距離が発生するため、移動や搬送のための追加作業が発生する問題があった。

②共存、③協働の a.同期、b.協業の場合は人とロボットが触れ合うことはなく、近接化するケースとなる。人との接触安全確保が難しいが、スペースメリットを活かしたいケースとしてよくみられる分担方法となる。

③協働の c.協調は人とロボットが接触することを前提とした作業分担方法となる。共存・協働化では柵の無いモノづくりが構築できることで、人との直接的な支援が可能となる。さらに同じ作業空間上で作業の並行処理、同期作業、さらには協調作業ができ、それらの作業が工程順序を乱すことなく実行できるメリットがある。

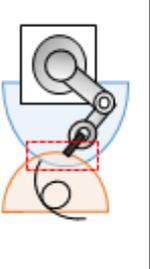
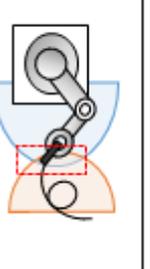
Operation mode	① Auto	② Co-existence	③ Collaboration		
			a. Sequential Collaboration	b. Cooperation	c. Responsive Collaboration
Schematic					
Space wrap	N/A	N/A	A	A	A
Timing wrap	Diff.	Diff.	Diff.	Same	Same
Machining point	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Same

Fig.4-6 Industrial robot operation mode arranged by human and robot interaction level

この理由を考察してみると、図4-7に示すように自動車部品は比較的固いものや尖ったものが多く、協働化のためのリスクアセスメント[27][97][98]を実施した場合に治具、ツール、ワークとの間で起こりえる挟まれリスクへの配慮が必要となる。技術的にはこの領域が最も難しく、適用毎に安全確保の対策を考える必要がある。

最終的な安全確認と責任の所在はユーザが担う必要があり、安全確保の対策はユーザが独自に対応するケースが多い。協働化事例を踏まえて、今後の協働化を進める上での安全課題を考察する。

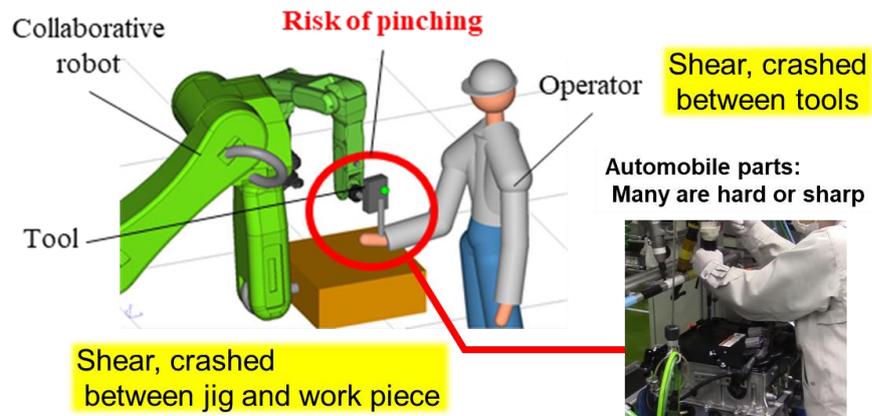


Fig.4-7 Typical industrial safety requirements for Cobot application in typical automobile manufacturing field

4. 2. 3 共存・協働作業の適用対象工程の選定

2015年に協働ロボットが産業界に多くリリースされ、実際のライン・工程に活用できるか検討をすすめた。検討の考え方として、適用事例の実績づくりを踏まえて、使う上でのルール整備や仕組み作りが必要と考えた。協働ロボット自身がまだ生産台数も少なく割高で、かつゆっくりとしか動けないことを踏まえて適用工程の選定を行った。

工程選定にあたって、人が中心に作業している工程が多い組立ライン及びその作業プロセスに着眼した。図4-8に示すように、自動車製造の組立工場の自動化率は多くの場合は高度な技能が必要であるため、数%程度となっていることが多い。

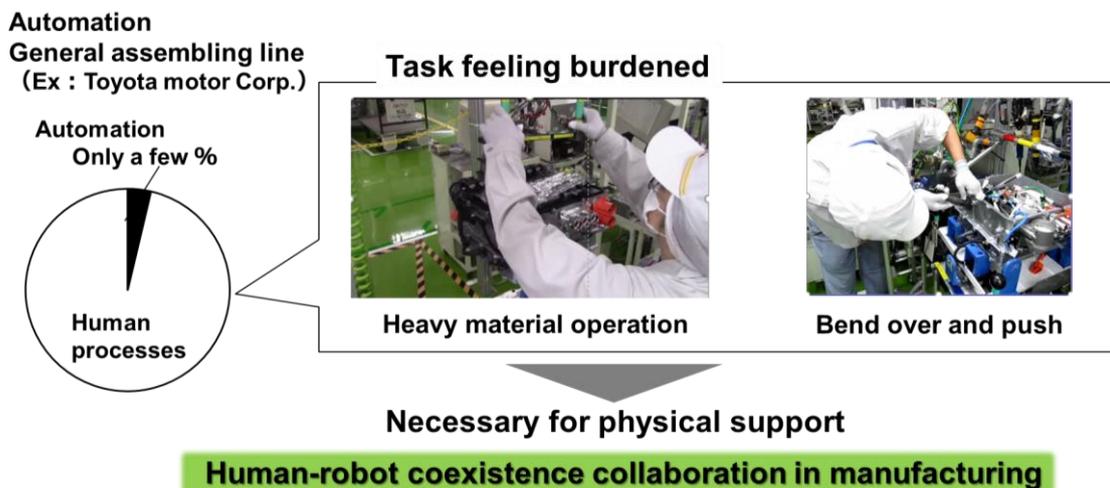


Fig.4-8 Practical problem in automobile assembling processes including tasks feeling burdened by human worker as an example of Toyota motor corp.

その作業の中には重量物の取りまわしや腰をかがめての作業等もあり、負担感が残存することが問題であった。そこで今回は、これらの作業に物理的なサポートをロボットが提供することで人との共存・協働を活かしたモノづくりを実現することを検討することとした。

共存・協働化適用工程決定とアプローチとして、作業者負担軽減および作業プロセス低減の実証を行う。すべてが手作業で行われる工程で、多種少量・変量生産のラインを選定対象とした。その候補の中でHVインバータ補給パーツラインに着目した。

該当工程は、「お客様に安心してHV車に乗っていただく」ため、比較的長い期間をサービスパーツとして供給、サポートする必要がある工程である。初代プリウスのHVインバータを継続的に製造している。本工程の特徴として以下があげられる：

- ・生産 : 極少量・変量生産 平均1.5台/日
- ・設備 : 従来ラインを流用
- ・ワーク特徴 : 21kg、全方向からの組付/締結作業
- ・作業特徴 : 全14種類、157本のボルトを締結
- ・作業手順数 : 600プロセス
- ・サイクルタイム : 4から5時間
- ・作業者 : 高齢者と女性

生産している製品の特徴を図4-9に示す。製品重量が20kg程度と大きいこと、製品面の6方向全てに組付けと締結が存在し、ボルト締結の種類と本数が多いことがあげられる。

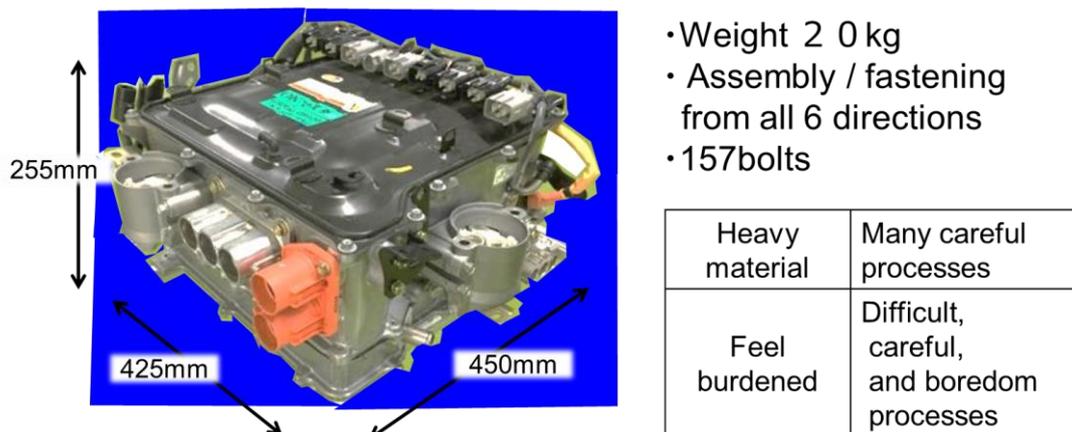


Fig.4-9 Hybrid inverter product appearance and features and manufacturing process key point for human workers

本対象工程では重量物のハンドリング作業が多く、ワークの位置、姿勢変換時にやりにくさや気遣いが必要となる問題があった。次に該当工程の作業フローとそのプロセスを分析した結果を図4-10に示す。

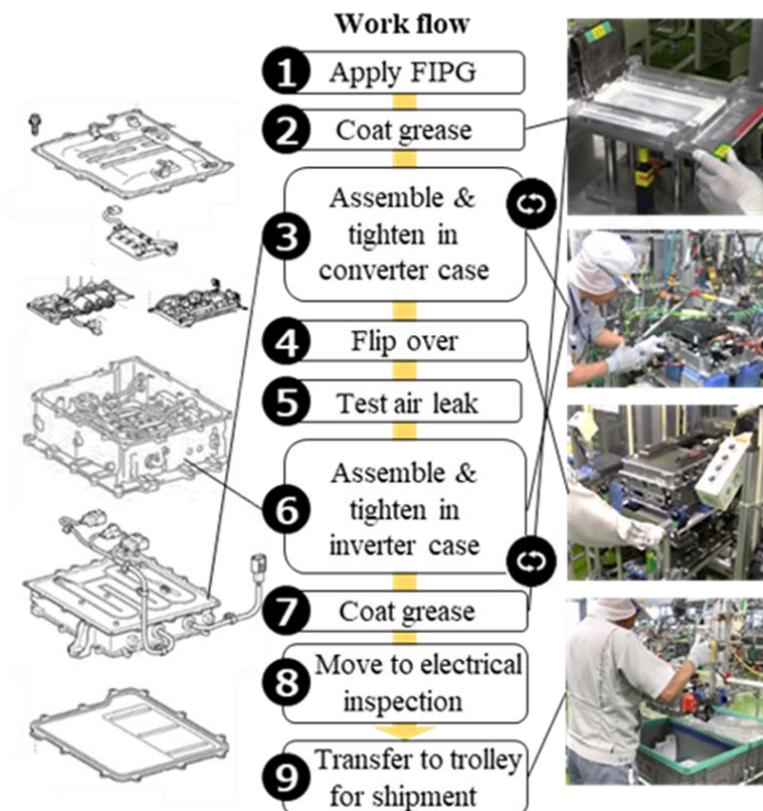


Fig.4-10 Hybrid inverter assembly flow and practical process in service parts manufacturing line

組み立てプロセスに応じて部品とボルトをピックアップし、指定された工具を使って締結する必要がある。締結順序、トルクの管理など慎重な作業が必要で作業プロセスと検査を確実に実行すること、自工程完結できることが要求される。従って、覚える手順や守るべき項目が多いため習熟するための期間が長くなる傾向がある。作業を確実にを行うための手順、その確認などプロセス数が多いことも問題であった。

HVインバータのケース中及び外側に部品を組付け、構成する部品間をワイヤーハーネス(W/H)でつなげる。接着剤塗布や導電性グリスの塗布なども作業の中に含まれる。組付けが進むごとに製品重量が増加する。あわせて製品面の全ての6方向での組付けがあるので重量物となる製品自体の上下、左右反転を繰り返す必要がある。また、配線の取り回しをしながら締結するなど高度な技能も要求されるプロセスが含まれていることが特徴である。

各作業プロセスの特徴を気づかい、やりにくいという観点で整理した結果を図4-11に示す。気づかい作業に関してはボルト締結種類が多いため、トルクチェック、部品や工具の選

扱で覚えるプロセスが多いことが挙げられる。また、ワイヤーハーネスなどを慎重に配策する必要のあることも一因として考えられる。特にワイヤーハーネスをかき分けながら締結するなど、第3の手が欲しくなるような作業も内在する。安全、エルゴ面では重量物の反転や搬送などの作業が存在する。

Task feeling burdened

Careful process	Difficult process
<ul style="list-style-type: none"> • Torque check • Selection tool and parts • Wire-harness connecting <p>Many processes</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • High level tasks for human workers Ex.) Tightened with wire-harness holding process 
<p>Heavy material operation Safety ergonomics issues</p> <p>Rotation handling process</p> 	<p>Transfer handling process</p> 

Fig.4-11 Task feeling burdened process examples in hybrid inverter service parts line for applying human robot coexistence and collaboration

4. 2. 4 選定工程の作業プロセス分析

選定したHVインバータ補給パーツラインの従来工程の外観、工程概要、その作業フローを図4-12に示す。作業フローである①から⑨までの作業プロセスは図4-10で示したものと同一である。ライン全体の大きさは4m×8m程度となる。

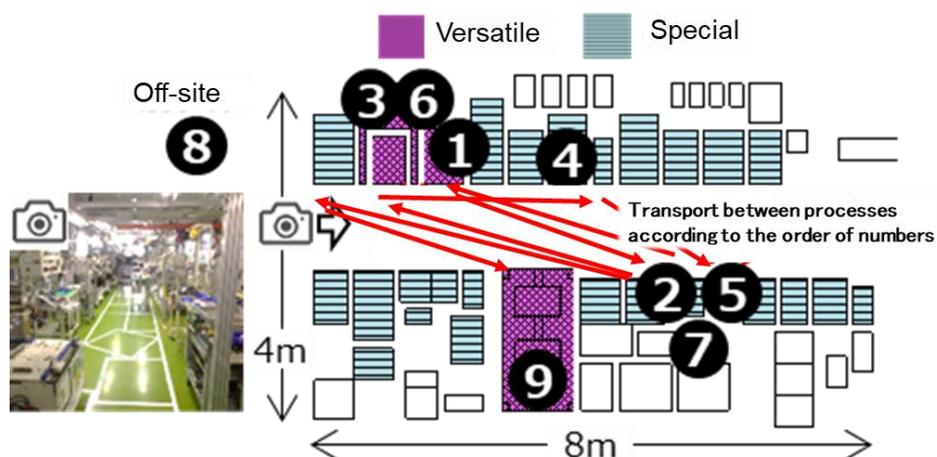


Fig.4-12 Hybrid inverter service parts line layout and out of view

設備の構成として車種ごとの専用設備が多く存在するため、その間を作業者が搬送しながら組上げていく。従って、工程間移動のための歩行のムダなどが発生し、作業プロセス数が多いという課題があった。

組付け作業分に着眼し分析を行うと図4-13に示すように57%が締結関連、11%が搬送関連作業であり、その中には腰をかがめた状態で行う締結作業など作業者に負担をかける作業があった。

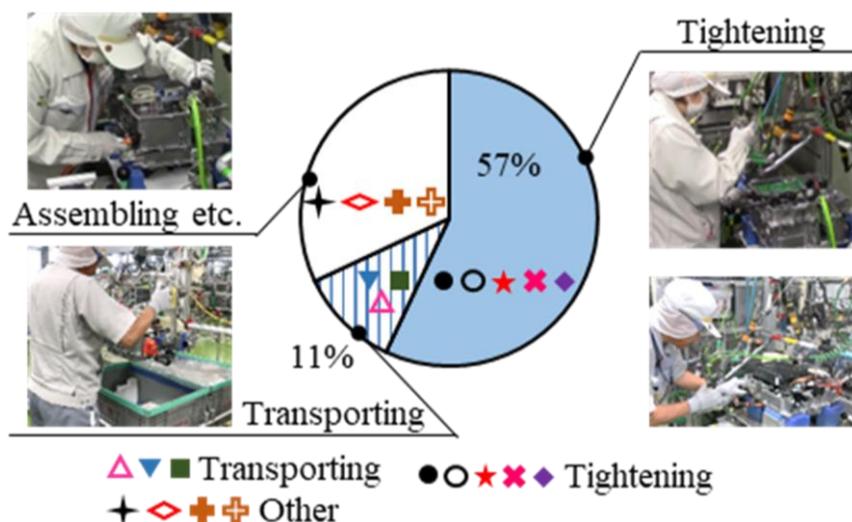


Fig.4-13 Human process analysis in hybrid inverter service parts assembling line for tightening, transporting and assembling tasks

これらの作業に着目し、共存・協働作業に向けた作業分担と工程集約を実施した。負担感のある作業と作業プロセス数の低減の実現を行う。人とロボットの作業分担の考え方を工程の課題、作業例とそのアプローチで整理したものを表4-1に示す。

Table.4-1 Approaches and task planning for automation coexistence collaboration

Problems in practical line	Examples for process	Countermeasure concept
Heavy parts handing	Flipping upside down Rotating right and left Transporting	Tightening Sealing Cobot employment (Coexistence collaboration)
Many processes	Parts selecting and picking Assembling Tightening	Transporting Positioning Cobot employment (Automation coexistence collaboration)
Careful work Depending on human memories	Inspection Quality check Torque check	Transporting Positioning Cobot employment (Automation coexistence collaboration)
Difficult work combinational And/or parallel process	Tightened with positioning and adjusting	Transporting Positioning Cobot employment (coexistence collaboration)

作業分担の考え方として、1章で人とロボットが意思をもって自律的に助けあい、物理的な支援を行うことができる仕組みを提案した。実ラインの工程計画を検討するうえで、人とのインタラクションのレベルの観点では人に対するインタラクティブな負荷と置き換え X 軸に尺度を設定、タスクの難しさを Y 軸にその尺度を設定した。タスク環境の複雑さについては本論文では定型作業を対象とするため、その複雑さのレベルは低いと考えた。以上の観点を踏まえて、人とロボットの作業分担を図4-14に示すように作業負荷と作業難易度としてのタスクレベルの観点で整理を実施した。

まず、タスクレベルが比較的高い作業の中から作業負荷が高い作業に着目し、人が判断力を補うことでロボット作業にできるものを共存・協働作業とした。この考え方を全体作業の大部分を占める締結関連作業に着目し、具体的な分担計画について述べる。

ロボットは重量物のハンドリングや精度よく繰り返し作業を行うことに適していることから、タスクレベルの低い単純作業をロボット作業とした。このような作業は組付け、検査作業と同期して実施する必要がある付随作業であるケースが多い。従って、動作モードとしては共存・協働作業を想定して工程計画を行う。

また、エルゴノミクスの観点から HV インバータのケースを協働ロボットで把持し作業手順および作業者の身長に応じた位置、姿勢を提供できるようにした。この時、ロボットがワークを介して作業者と接触する協働作業状態が形成される。動作速度は遅いが、比較的長い時間協働作業が実行されることが特徴となる。

本研究では、この概念で活用した協働ロボットを搬送・治具協働ロボットと定義する。製品重量が20kgを超えるため、35kgf可搬のロボット(ファナック製:型式 CR35iA)を採用した。本ロボットは 3 章で述べた柔らかい被覆の設計方法と同じ考え方で衝撃力と挟圧力の緩和の対策を実施し、安全な接触検知と停止能力を有することを特長とするロボットである。なお安全認証レベルは PL=dとなる。

次にネジ締めとトルクチェック、塗布などの中で比較的タスクレベルの低い作業についてロボットで実施することとした。高度な組付、検査や判断力が求められるタスクレベルが高い作業は人作業とした。

ボルトセットは適切なボルト選択とネジ穴への挿入が必要であるため人が担当し、締結は規定トルクで締め付ける単純作業であるためロボットによる作業とした。より積極的にロボットが人と協調することで実現できる作業として、ワイヤーハーネスを人がかき分けながらロボットが締結作業をする協働作業も導入する作業計画を行った。

人とロボットが共存・協働作業を通して締結・塗布作業を実行する。一時的な共存作業だけでなく、協働作業になるケースが多い。従って、ネジ締め作業実行時において、締結時はネジ締め時間に依存するが、ネジ締め部位の間を移動する付随動作の速度は高くすることが生産性の面で要求される。この場合に接触時の安全確保が問題となる。この安全性と生産性の両立については4.3節、4.4節で述べる。

本研究ではこの概念での活用方法に採用した協働ロボットを締結・塗布協働ロボットと定義する。動作範囲と設置スペースを考慮し7kgf可搬のロボット(ファナック製:型式 CR7iA)を採用した。本ロボットも安全な接触検知と停止能力を有するロボットである。なお安全認証レベルはPL=dとなる。

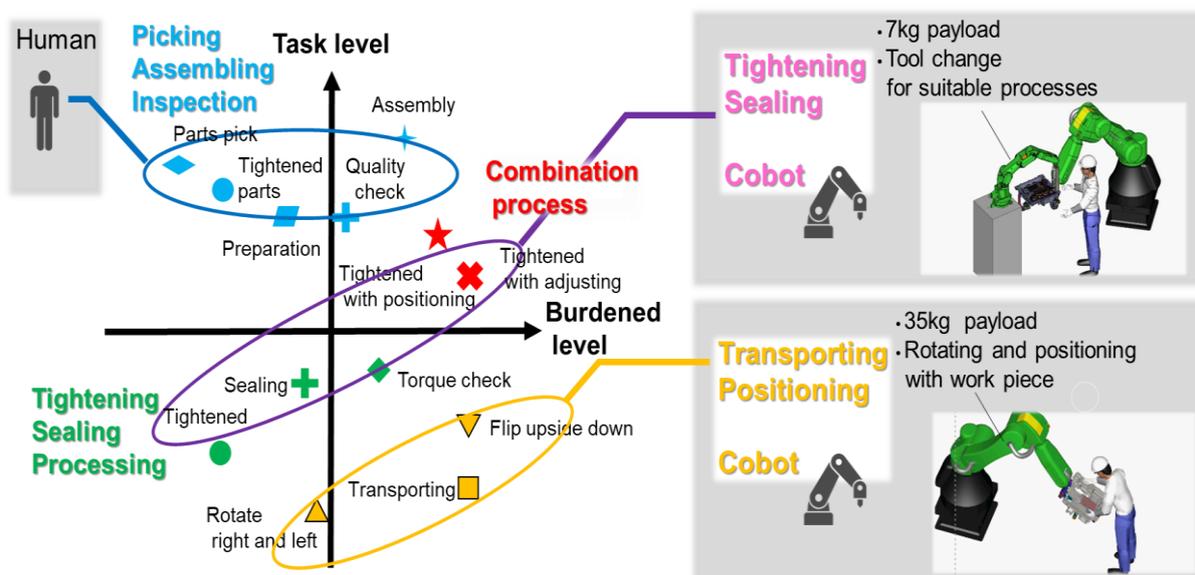


Fig.4-14 Task sharing human and cobot process in hybrid inverter service parts line

共存・協働作業の適用を積極的に行うことで、人がロボットと同じ作業空間、タイミングでワークに接近できる。このメリットを活かして、人を中心にしたレイアウトを構成し、無駄な歩行が発生しないように工程計画を実施した。人の作業性を重視した位置に搬送・治具協働ロボットを配置した。これにより、作業者の身長、体形にあった作業姿勢の提供が可能となる。また、見やすい作業姿勢の提供行えるように工夫をした。

図4-15に示すように、従来のライン構成では専用設備も多く、作業員動線も複雑であった。開発したラインレイアウトでは協働ロボットを導入することで、人を中心にした汎用設備を配置し効率的な共存・協働作業ができるように配慮した。人とワークの位置、作業動線を踏まえて、特に作業頻度が高い締結・塗布ロボットと治具・搬送ロボットを人の近傍に配置した。部品の供給や順立て、車種専用の設備は全体の作業プロセスを踏まえて動線がミニマムになるように周囲に配置した。

以上の工程設計で作業負荷を低減できる反面、ツール・治具・ワークとの挟まれなどのリスクに直面する頻度が多くなる。安全性と生産性を両立することが従来技術では困難であった。このため、協働ロボット活用は直接的、かつ積極的な協働作業の段階ではなく、柵の無い自動、共存、シーケンシャルコラボレーションの状況にあることが指摘されている[24]。本論文では直接的、かつ積極的な協働作業を採用し、安全性評価とその妥当性確認を4.

3節で述べる。協働作業実現のために開発した安全技術とその評価方法について説明する。また、負担感の低減、作業プロセス数の低減を指標に安全性と生産性が両立できる共存・協働作業を実証した結果を4.4節にて記述する。

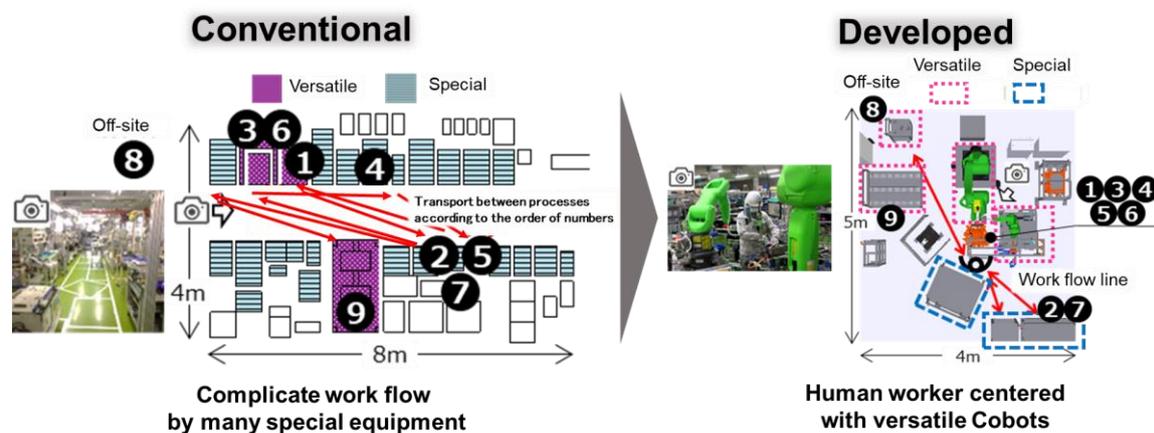


Fig.4-15 Comparison layout and process mapping for conventional and developed in hybrid inverter service parts line

4.3 協働作業における安全性検証と妥当性確認

4.3.1 安全性検証と妥当性確認のステップ

第2章で人が受け入れられる物理的な最大感覚として痛覚耐性値を明らかにした。ロボットにこの感覚を持たせることで、人に与える力の上限を要求事項として明確化した。これに対して設計された設備、ロボットシステムが本来意図された用途や目的を満足しているか、実用上の有効性についての確認を行う必要がある。

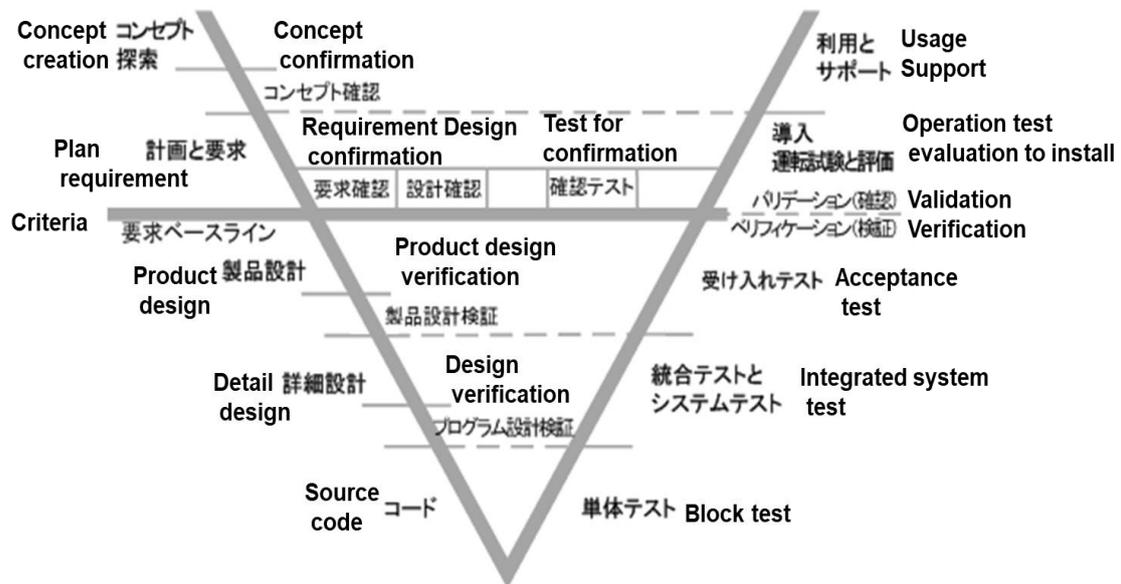
共存・協働のためのロボットシステムが意図した通り開発、製造、調整が行われ、実際の使用段階で正しく運用しうる状態であるかを確認する必要がある。検証(Verification)と妥当性確認(Validation)という2つの視点から評価することが重要となる。

図4-16に示すように、一般的にサービス、システムなどの品質を確保する基本手段として、そのしくみが提供されている。多くの産業分野で検証確認活動に活用されている。ISO 9000などの国際規格、または国内規格、業界ガイドラインに採用されている手法である。

検証のフェーズではシステム全体が仕様、設計、計画段階の要求事項を満たしていることを確認する。本研究ではその要求事項として、人が安全な共存・協働作業をするために痛覚耐性値を明確化した。

妥当性確認のフェーズでは実際の適用、運用状態において痛覚耐性値を満足し、実用上の有効性について評価を行う必要がある。

しかしながら、人とロボットの共存・協働作業においてはいまなお、妥当性確認の方法が研究段階にある[99][100]。そこで本研究では実用性の高い検証方法を提案し、ISO/TS 15066に対する妥当性確認を行うこととする。



Quoted from following website and added explanation in English;

<https://www.itmedia.co.jp/im/articles/1111/07/news153.html> から抜粋

Fig.4-16 Verification and Validation for Human and robot coexistence collaboration safety

協働ロボットを導入するにあたり、安全性検証とその妥当性確認についてリスクアセスメントを通して実施する。その考え方とステップを5つに分けて図4-17に示す。

ステップ1として採用する協働ロボットシステムを機械として捉え、備える安全機能やそのしくみを確認する。この安全機能がある前提でリスクアセスメントを進める。詳細は4.3.2節で述べる。

ステップ2として危険源、危険状態、危険事象の同定を行う。主な内容は協働ロボットを動力源とする挟まれ事象の同定が主たる内容となる。詳細は4.3.3節で述べる。

ステップ3としてリスクの見積もりと低減を行う。ステップ2で同定した事象のリスク見積もりとそのリスク低減について詳細は4.3.4節で述べる。

ステップ4として残留したリスクの評価と安全性に対する妥当性確認を行う。妥当性確認に関しては、今回の適用上で最も重要となるツール先端とワークエッジ部などの狭隘部位の挟まれについて妥当性確認方法を提案し、その有効性を明らかにする。詳細は4.3.5節で述べる。

ステップ5として使用者におけるリスク低減方法について述べる。本研究では定常作業時の残留リスクを「軽」以下と低減することが達成できた。従って、非定常作業時の残留リスクを

明らかにし、この対策について述べる。主な対策として定期的な教育、点検に関わる対策内容を明示する。詳細は4. 3. 6節で述べる。

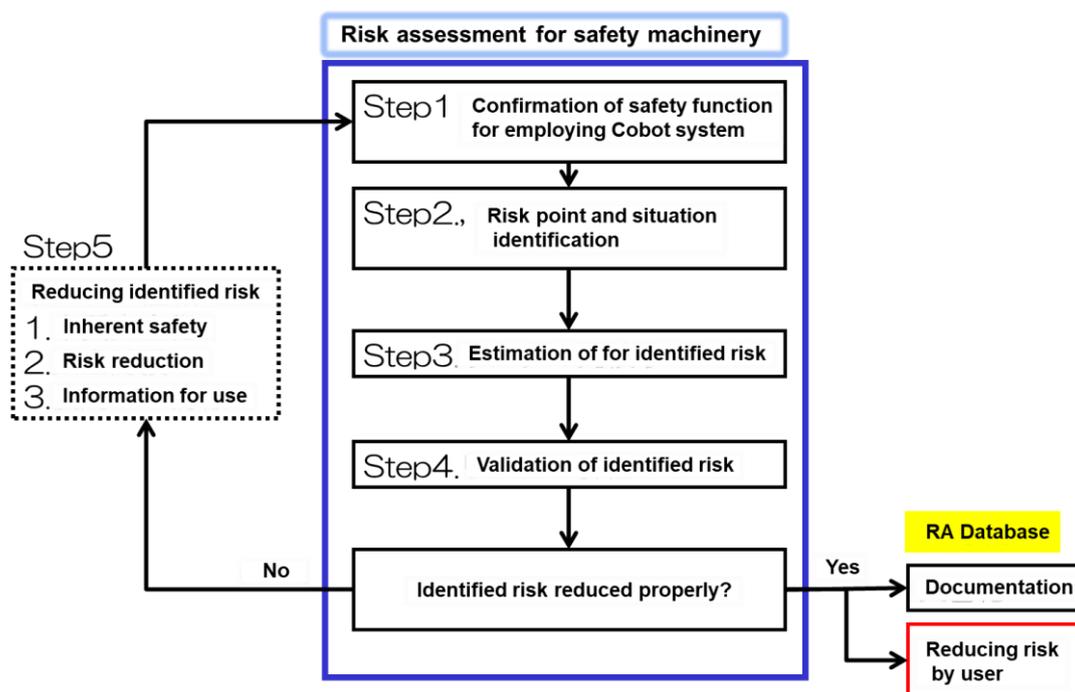


Fig.4-17 Risk assessment procedure for safety of machinery in human robot coexistence and collaboration system

4. 3. 2 リスクアセスメント Step1～機械制限の確認

機械の使用上の制限として、機械の使用目的、作動する範囲、動力の大きさを確認する。今回は35kgf可搬と7kgf可搬のロボットを採用する。加工物の制限として材質、加工方法などを確認する。HV インバータはアルミニウム及び鉄製の部品で構成され、R1以上の面取りがされている。加工技術としてはネジ締め、シーラ塗布が対象となる。

使用環境の制限として設置場所として屋内外、温度等の設置環境があるが、今回は電子部品工場内ということもあり、屋内の比較的クリーンな環境での実証となる。

使用者の条件として性別、年齢、免許や資格などの能力がある。高齢者を含む男女が作業に従事する。協働ロボット使用にあたっての基礎的な教育を実施し、共存・協働作業従事の資格を有するものが該当作業に従事する。

一般的なリスクアセスメントは通常、安全装置がない状態で実施する。協働ロボットの安全機能は付加され、有効に機能している前提でリスクアセスメント(RA)を実施することとした。この際に協働ロボットの安全機能の代表的な例として接触力監視機能、速度監視機能、動作領域制限機能がある。安全機能に適切な信頼性、認証範囲の確認が必要である。以上の機械の使用上の制限に関する確認の概要を図4-18に示す。

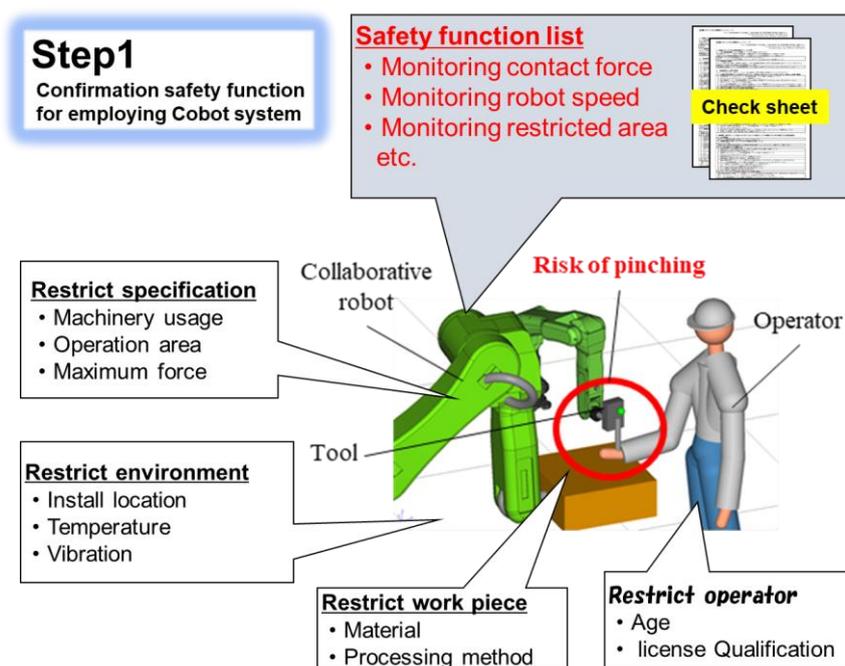


Fig.4-18 Step1 Confirmation safety function and condition

代表的な協働ロボットの安全機能の一覧を表4-2に示す。各機能は本研究でも活用している。各機能で重要なのは認証内容となる。安全制御に関しては $PL=d$ または制御カテゴリ3以上、各機能が有効となる動作領域、速度条件の確認が必要となる。

Table.4-2 Step1 Cobot typical safety function item list

Item※	Outline of function	Note
Safety stop	Motor power off and/or control stop refer to ISO10218-1 5.5.3	Stop category 0 , 1
Stop situation monitoring	Stop monitoring as stop category 2 and immediately protective stop when robot unintended motion cause	Reducing risk for unintended robot motion
Contact force monitoring	Protective stop when robot unintended motion cause	Reducing impact and/or jammed force risk for unintended robot motion
Velocity monitoring	Protective stop when robot exceeds set velocity	Reducing impact force risk for unintended high robot velocity
Limitation of robot power	Protective stop when robot exceeds set power, force, and/or pressure	Reducing impact force risk for unintended high robot power, force, and/or pressure
Limitation of robot envelope	Protective stop when robot exceeds set envelope, restricted area	Reducing impact and/ or jammed force for unintended exceeding set envelope, restricted area
Safety motion for unloading	Safety motion for reducing jammed force	Reducing jammed force for unintended exceeding set envelope, restricted area

※ Cobot safety function required to keeping $PL=d$ / control category 3

本研究で採用したロボットの安全制御レベルは PL=dまたは制御カテゴリ3である。ISO/TS 15066 の認証範囲は動作速度とその接触状態が限定的な条件のため、実際に適用する条件下での評価をステップ4で行うこととした。

4.3.3 リスクアセスメント Step2～危険事象の同定

協働ロボットは隔離がないため可動範囲が隣接工程の作業範囲と重複することがある。当該工程の協働ロボットが危険源となる隣接工程や通路への影響も考慮する必要がある。本研究での開発したラインは1工程に集約化されているので作業重複が発生しない構成としている。しかしながら、2台の複数ロボットを協働化として活用しているため図4-19に示すように、危険源の同定を厳密に行う必要である。

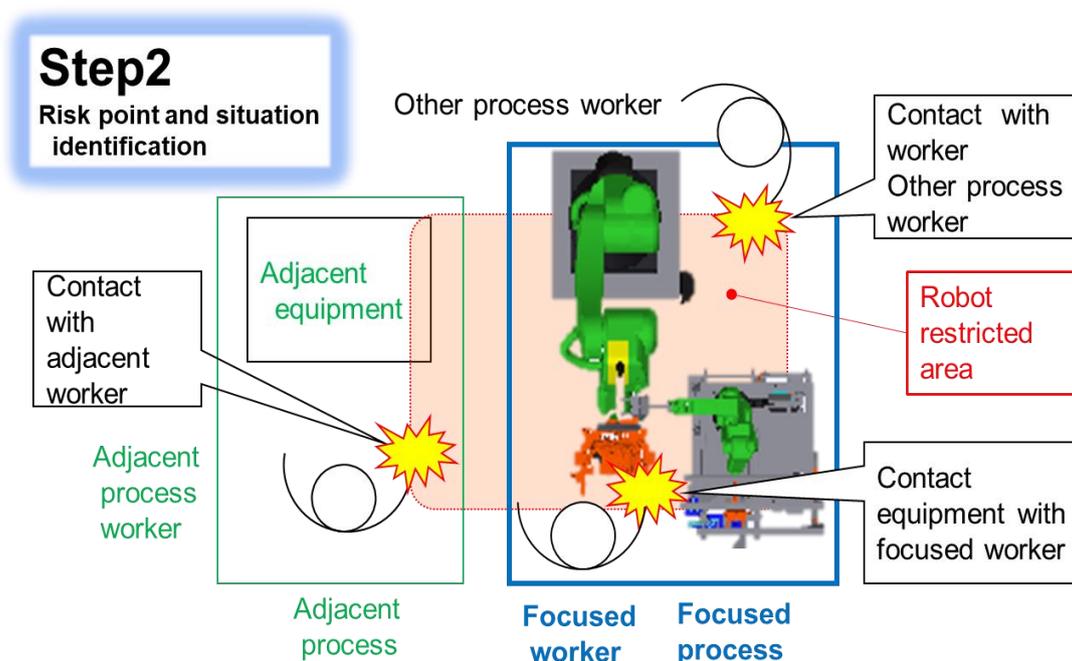


Fig.4-19 Step2 Identification of risk point and situation with Cobot

危険源、危険状態、危険事象の同定として、ロボットが保持した治具やワークとの挟まれや接触のケースはロボットにおける動力の危険源として検討を進める。本研究で適用した工程の構成要素ではすべて協働ロボットが動力の危険源となる。表4-3に示すように、今回採用した搬送・治具協働ロボットと締結・塗布協働ロボットが危険源となる。

定常作業時でのミスを想定した不意の接近の場合は考慮すべき頻度を“低”と見積れる。ロボットの定常動作時に不意の接近をロボットがした場合を検討する。通常動作中に通常はいない人が接近した場合についても頻度は“低”と見積れる。ロボットの定常動作はロボットの姿勢にしたがいリスクも変わるため、場合分けして評価を進めることとした。

Table.4-3 Step2 Risk assessment elements for all hazardous phenomena

Risk assessment elements	Power	Heavy objects	Slip / stumbling	Others	Electric	Thermal	Sound	Vibration	Radiation	Hazardous substance	Explosion / fire	Ergonomics	Environment
Transporting Positioning Cobot ①	●	○			○	○					○		
Tightening Sealing Cobot ②	●	○			○	○					○		
Cobot① controller		○			○						○		
Cobot② controller		○			○						○		
Work piece		○		○									
Screw tightened tool	○				○								
...													

ロボット定常動作による場合分けを行う。各プログラムの位置、姿勢毎に動作を細分化して接触・挟まれに対するリスクを洗い出した。いずれも搬送・治具協働ロボットと締結・塗布協働ロボットが危険源となり、図4-20に示すように、ロボット×周辺の固定物、ロボット×ロボット、ロボット(締結ツール)×治具またはワークが危険事象として同定できる。

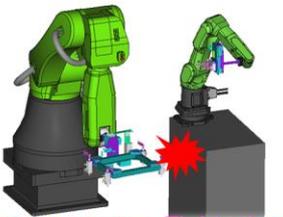
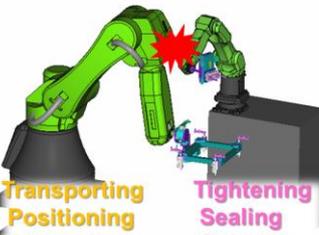
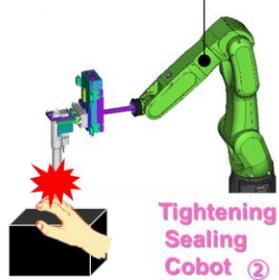
	Cobot × Peripheral devices	Cobot × Cobot	Cobot(tool) × Jig / Work piece
Estimated risk			
①	○	○	
②	○	○	○

Fig.4-20 Step2 Identified jammed force risk with Cobots

4. 3. 4 リスクアセスメント Step3～リスクの見積もりと低減

危険事象として同定したロボット×周辺の固定物、ロボット×ロボット、ロボット(締結ツール)×治具またはワークについて、各シーンにて衝突・挟まれ状態を洗い出した。人体部位の押しつぶされることを回避するための最小隙間(ISO13854・JISB9711)を確保する必要がある。

る。また、定常作業に加え、非定常作業や予見可能な誤使用時の姿勢も考慮する(しゃがむ、覗き込む等)必要がある。この状況を整理したものを図4-21に示す。

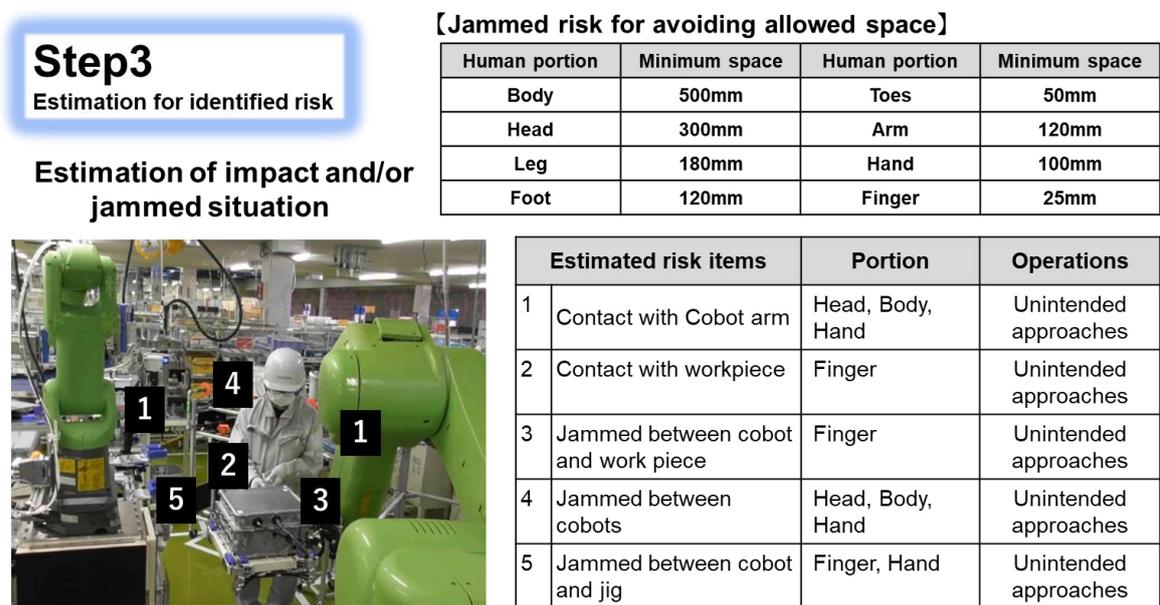


Fig.4-21 Step3 Estimation of identified risk for impact and/or jammed force

この結果を表4-4に示す危害のひどさの見積りに当てはめると、危害のひどさの判定が「中」以上となる可能性がある。このため、本質的な安全を確保するためにロボット×周辺の固定物、ロボット×ロボット、ロボット(締結ツール)×治具またはワークのそれぞれのケースに分けて動作制限(PL=d)にて隙間を確保するなどの本質対策をすることで安全性を確保することとした。

Table.4-4 Step3 Estimation and damage judgment by ISO/TS15066 and ISO 12100

Contact portion	Jammed and/or impact force estimation results ISO/TS 15066	Severity evaluation ISO 12100
Others	Estimated values below human pain tolerance in transient and quasi-static situation	1 or 2
	Estimated values below human pain tolerance in transient or quasi-static situation	3 or 4
Head Face	Estimated values below human pain tolerance in quasi-static situation	1 or 2
	Estimated values over human pain tolerance in transient or quasi-static situation	3 or 4
Eyes	Estimated values exist in transient or quasi-static situation	3 or 4

具体的には図4-22に示すように、ロボット×周辺の固定物についてはロボットセーフティコントローラの機能でロボットと固定物との間に300mmの隙間を確保するように動作を制限した。動作を制限する際に、ソフトウェアによる動作制限が採用され、その技術の安全認証レベルは、PL=d が保証されている。

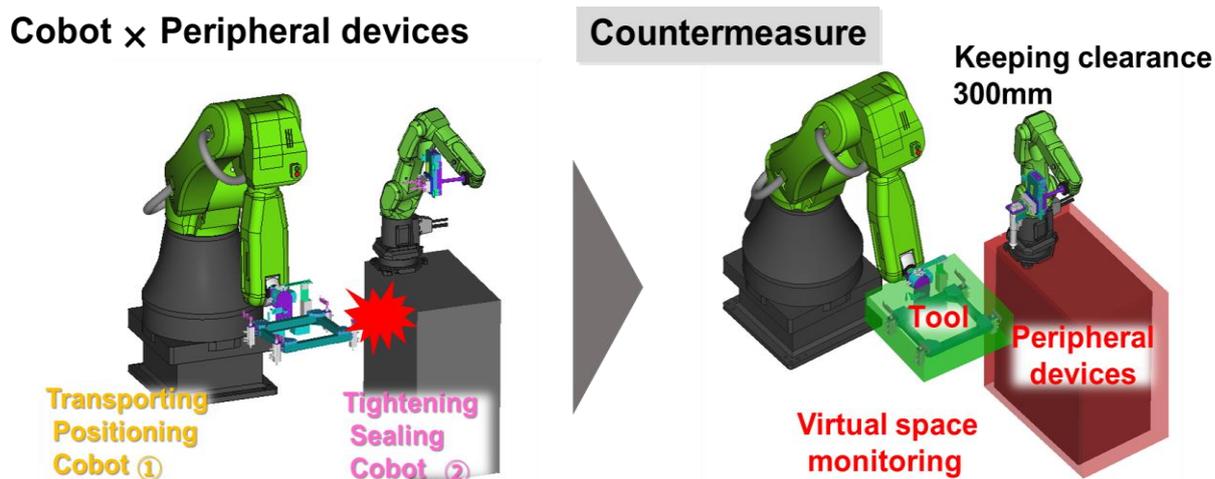


Fig.4-22 Step3 Countermeasure for Cobot × Peripheral devices contact

ロボット×ロボットについては図4-23に示すように、ロボットが同時に動作しないように保護停止でインターロック動作制限した。

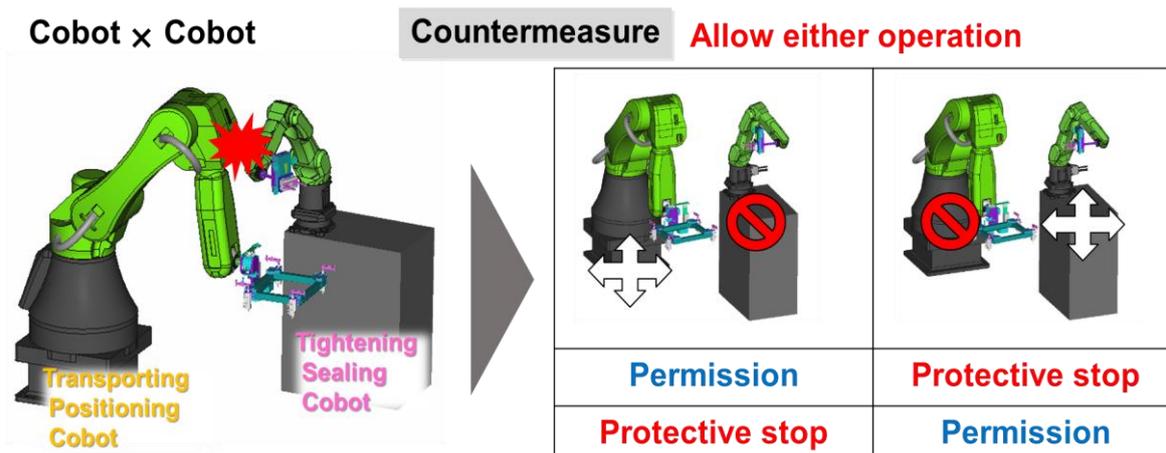


Fig.4-23 Step3 Countermeasure for Cobot × Cobot contact

以上の取り組みを図4-24に整理する。ロボットと治具や置台などの周辺機器、ロボットとロボットとの挟まれに対しては本質的に挟まれないように隙間を確保する対策を実施した。ツールとワーク及び治具との挟まれに事象に対しては作業を遂行する上で隙間を確保する

ことが困難である。そこで採用したロボットの接触検知と停止機能が有効に活用できないか安全性の評価及びその妥当性確認をすることとした。

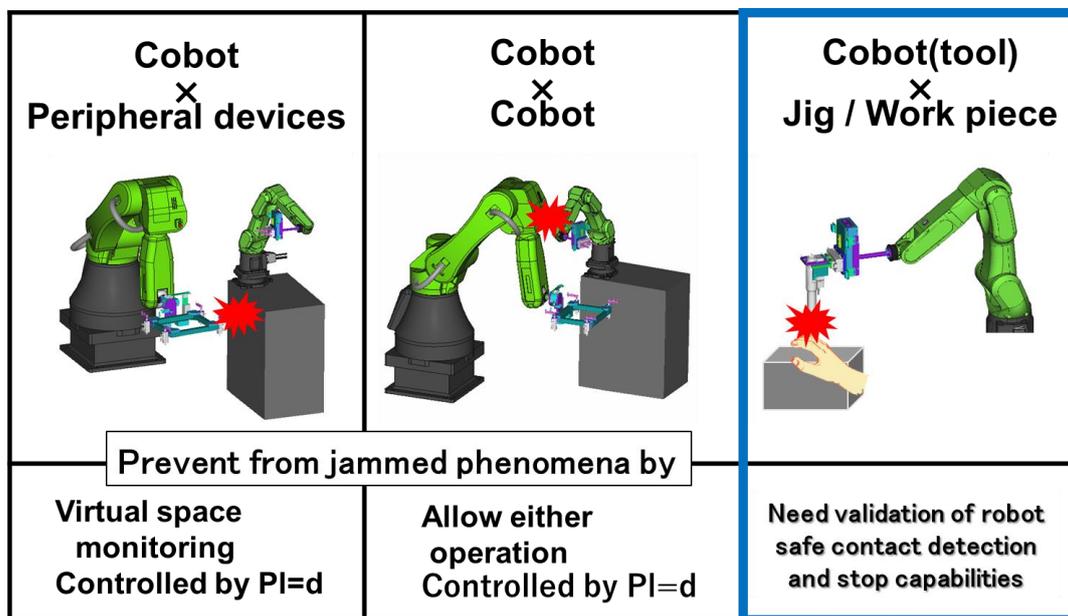


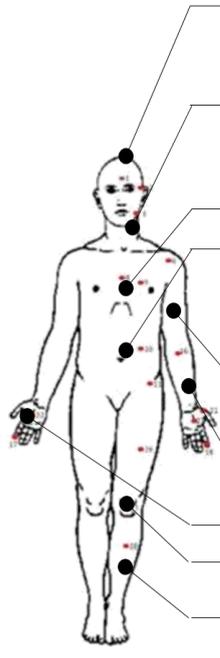
Fig.4-24 Step3 Countermeasure for risk reduction with human and Cobot operations for safe coexistence and collaboration

4. 3. 5 リスクアセスメント Step4～リスクの評価と妥当性確認

妥当性確認を実施するにあたり、その測定方法について述べる。接触状況に応じて面圧力の測定を実施する必要がある。ISO/TS 15066 においては力と面圧力の両方を考慮する必要があると記載されている。鋭利な部分の除去、付加的なクッションの設置等の接触面積の増加させることで面圧力測定は除外できるように配慮されている。広い表面積での接触及び軟組織が高い割合を占める接触については力の制限値を用いて妥当性確認が可能となる。接触の一例としてクッション付の機械表面、人の腹等や柔らかさを有する部位への接触が想定される。

従って、採用されるロボットシステムは可能な限り広い表面積を持つべきである。付加的クッションは、低圧力となる表面部を増加させることができる。3章で述べた人との接触を考慮し、機械的インピーダンスを考慮した柔らかい被覆を有するロボットシステムの提案はこの点でも有効であると考えられる。本研究でのロボット選定において、柔らかな被覆を有する35kg可搬のロボット(ファナック製:型式 CR35iA)を採用している。

身体の各部位の痛覚耐性値[18]を図4-25に示す。耐性値は2章で提案した準静的、過渡的の2つに分類、提示されている。各接触部位の機械的インピーダンスは有効ばね定数で表現されている。また、接触する部位を想定し、身体の機械的特性にあわせるために緩衝材の硬度とその厚さが開示されている。本研究でも本手法を用いて計測し、妥当性確認を進める。



Body region	Quasi-static	Transient	Effective Spring constant K [N/mm]	Attenuation material	
	Permissible force [N]	Permissible force [N]		Hardness [Shore A]	Thickness [mm]
Skull/forehead	130	N/A	150		
Face	65	N/A	75		
Neck	150	300	50	70	7
Back and shoulders	210	420	35	30	14
Chest	140	280	25	70	7
Abdomen	110	220	10	10	21
Pelvis	180	360	25	70	7
Upper arm elbow	150	300	30	30	14
Lower arm wrist	160	320	40	70	7
Hands/Fingers	140	280	75	70	7
Thighs/knees	220	440	50	30	14
Lower legs	130	260	60	30	14

Fig.4-25 Step4 Biomechanical pain tolerance in quasi-static and transient contact with body model parameters

複数部位における挟まれ事象を想定した場合の計測方法について述べる。複数部位へ同時に接触した場合、全ての接触部位を1つの系と考え、最も機械的インピーダンスが高い部位が支配的になると想定される。従って、有効ばね乗数は最もその値が高いものを選定する。緩衝材については硬度が最も高く、厚みが薄いものを選定する。

具体的な設定について図4-26に示す。締結・塗布協働ロボットとの接触を考慮した場合、上腕・前腕・手が接触する頻度が高いと想定される。この場合の測定条件は有効ばね定数 75N/mm、緩衝材の高度 70Shore A、厚み7mmを選択した。

治具・搬送協働ロボットとの接触を考慮した場合、胸・腹・背中が接触する場合の頻度が高いと想定される。この場合の測定条件は有効ばね定数 35N/mm、緩衝材の高度 70Shore A、厚み7mmを選択した。

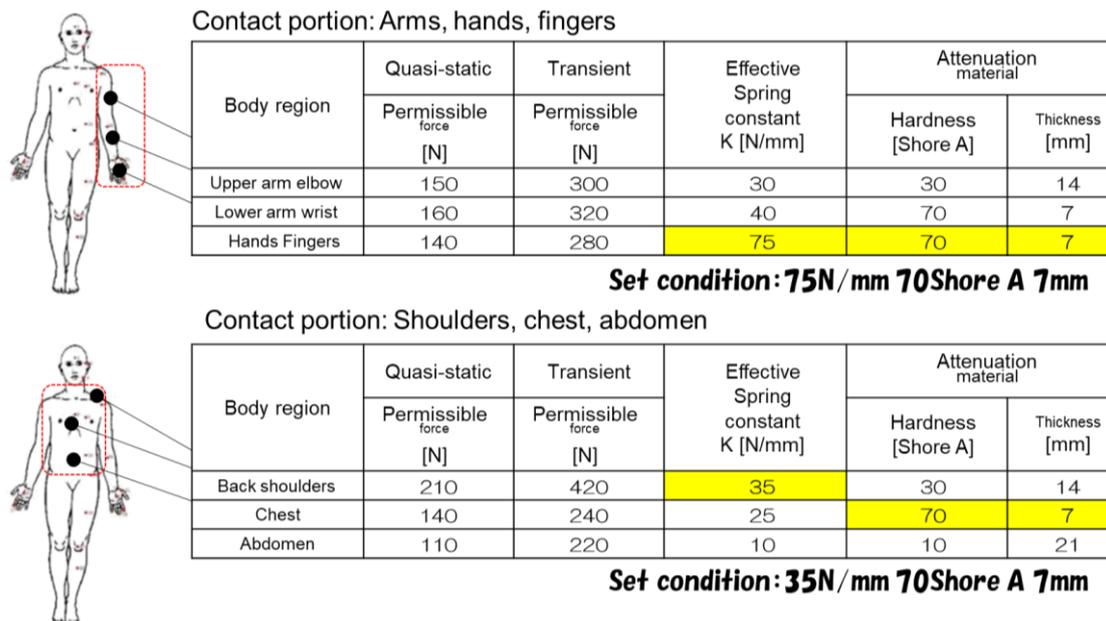


Fig.4-26 Step4 Procedure of biomechanical parameters selection for arms, fingers, shoulders, chest, and abdomen

次に、測定方法とその条件について述べる。特にロボット動作の設定、及び負荷の選定、計測器の固定方法を以下のように設定する。図4-27にロボット動作の設定条件を示す。

- I. ロボット動作
 - ・前後、左右、上下動作の3パターンを基本とする
 - ・直線動作(ハンドの向きは固定)
 - ・TCP 動作速度=50,100,250mm/s ※TCP はフランジ中心
- II. 測定点
 - ・各ロボットの最大リーチから測定器の設置場所を決定
- III. 負荷
 - ・無負荷、最大負荷の2点として測定を行う。
 - ・必要に応じて中間値を測定する
- IV. 接触停止力の閾値設定
 - ・ロボット動作・負荷の全ての組み合わせで誤検知しない(動作中に保護停止とならない)最少の値を使用する
- V. 固定方法
 - ・測定器の固定は基本的に衝突力測定治具を使用する
 - ・ロボットは、剛性のある定盤に固定する

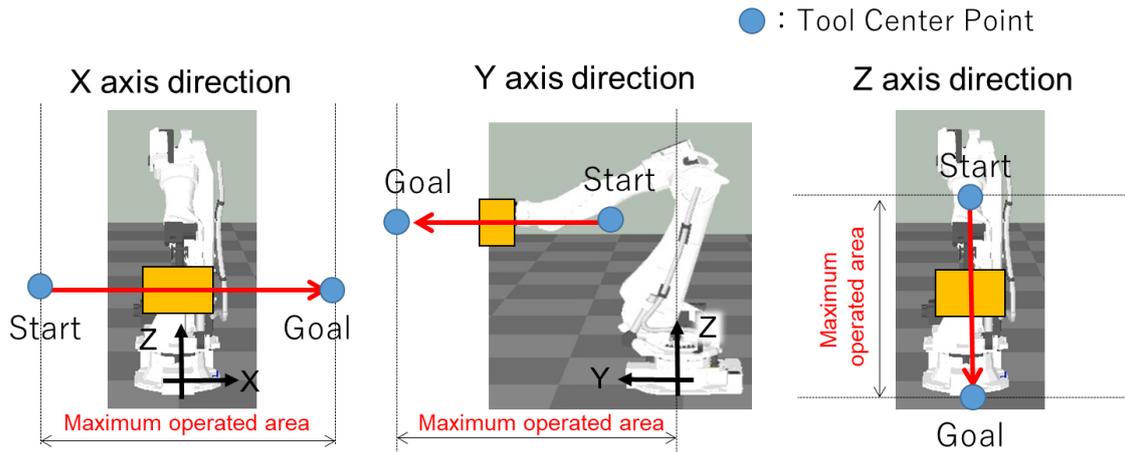


Fig.4-27 Step4 Procedure of measurement contact force by robot movement for x, y, z directions

次に測定器の選定を行う。図4-28に示すように、多くの企業から協働ロボット用の測定器が提供され[101][102]、その数も増えて充実してきている。いずれも ISO/TS 15066 に対応した計測器と測定に付帯類(必要なバネ、緩衝材)がセットになって提供されている。

Type	Simple	Narrow	Versatile
Supplier	GTE	GTE	Pilz
Product	F-500-Basic	F-250-Gripper	PROBms
Out of View			
Size [mm]	L310×W80×H50	L370×W105×H90	W120×D120×H140
Weight	1400g	1915g	1200g
Probe	Φ80mm t=70mm	20mm×45mm	Φ100mm t=140mm
Spring constant [N/mm]	Fixed (75)	Fixed (75)	9 variations (10,25,30,35,40,50,60,75,150)
Range	20-500N	20-300N	0-500N
C/T	1ms	1ms	0.5ms

Fig.4-28 Step4 Comparison of measurement instruments for safety validation in human robot coexistence and collaboration

本研究では測定部の寸法が比較的小型で取り扱いが簡便な GTE 社製の F-500Basic を用いて測定を行った。測定プローブの選定にあたっては、接触面は応力集中などが発生しない配慮が必要である。従って以下の要件を満たすことを確認して評価を行った。

- ①接触面は 10mm×10mm の正方形以上(各辺が 10mm以上)
- ②エッジ部は半径 2 mm 以上で R 面取り

有効ばね定数、緩衝材の高度、厚み選定し、測定プローブで妥当性確認を実施した。その計測状況を図4-29に示す。

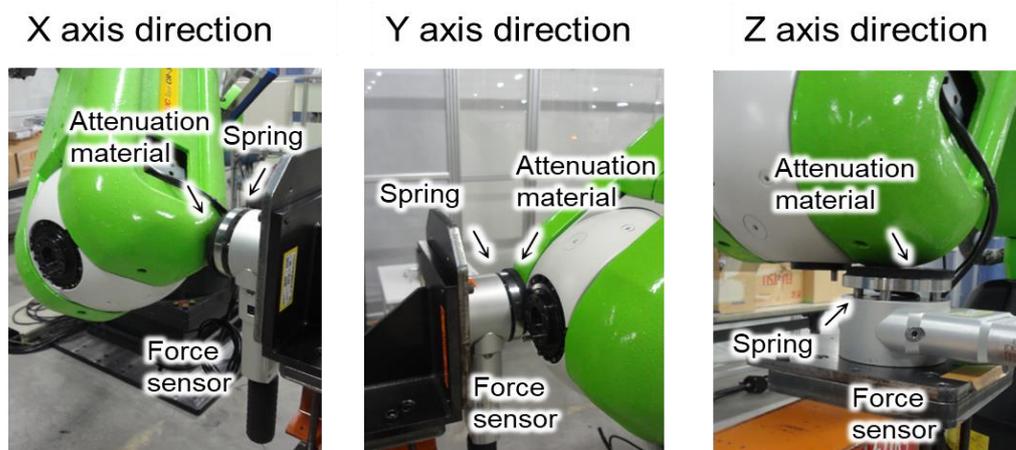


Fig.4-29 Step4 Procedure of measurement by robot approach x, y, z axis direction

測定した結果を、過渡的と準静的の2つの接触状態に整理する。接触状態によって得られた波形の判別が困難なケースもあるが、以下の定義に従い、過渡的と準静的接触として Δt の領域で整理したうえで判定を行う。

- ・過渡的接触: 人とロボットの一部との接触であって、人の身体部が挟まれずに、ロボットの可動部から後退できる、又は引っ込めることができる接触。なお、継続的に人体に力がかからないこと。
- ・準静的接触: 人とロボットの一部との接触であって、人の身体部が、ロボットの可動部と他のロボット等の固定部又は可動部との間で挟まれるおそれのある接触。

一般的な協働作業で想定されるロボット先端との接触を想定し、過渡的と準静的接触の実験を行い、 Δt の領域での最大値を導出することとした。実験条件として、250mm/s での接触を定格負荷で X,Y,Z の3方向に対して複数回試行を行った。実際の測定データの一例を図4-30に示す。

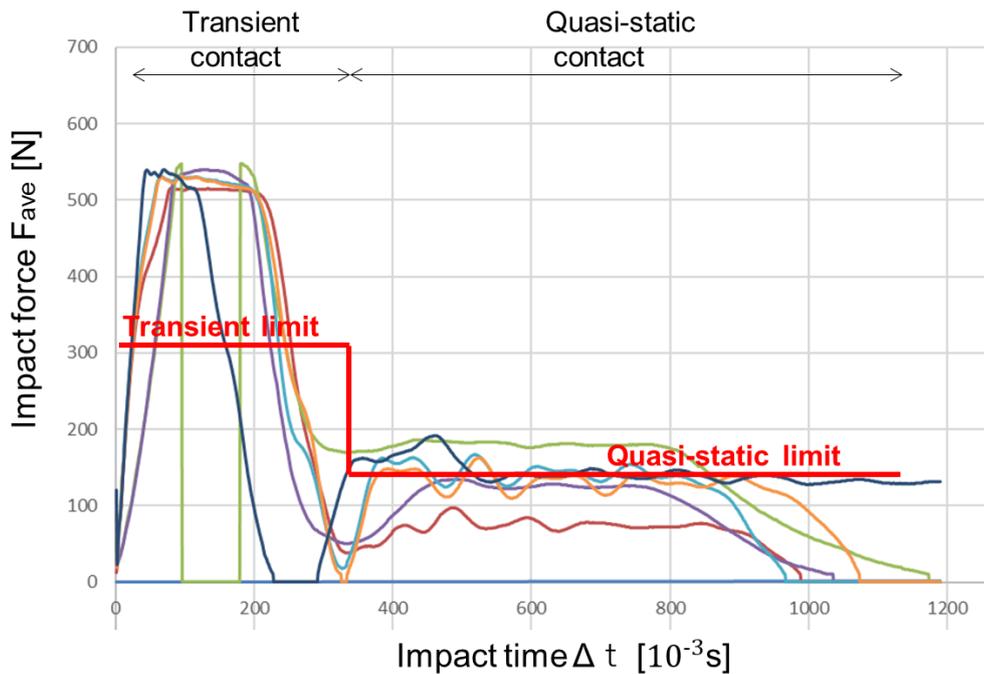


Fig.4-30 Step4 Measurement results sample curve in transient and quasi-static contact

以上の測定結果を考察すると、準静的接触許容値は採用したロボットが接触後に退避モーションする機能を備えており ISO/TS 15066 で開示されている痛覚耐性値をほぼ満足する。しかしながら、過渡的接触において ISO/TS 15066 で開示されている痛覚耐性値を大きく超えることが判明した。

過渡的な接触領域において、安全性が確保できる条件を調査するために、より詳細な実験を追加で行った。実験条件として接近速度を 50、125、250 mm/sの3水準、負荷を定格の 35kg、定格の半分に相当する17.5kg、無負荷の3水準に設定した。X,Y,Z の3方向に対して複数回試行した場合の最大接触力を整理した結果を図4-31に示す。

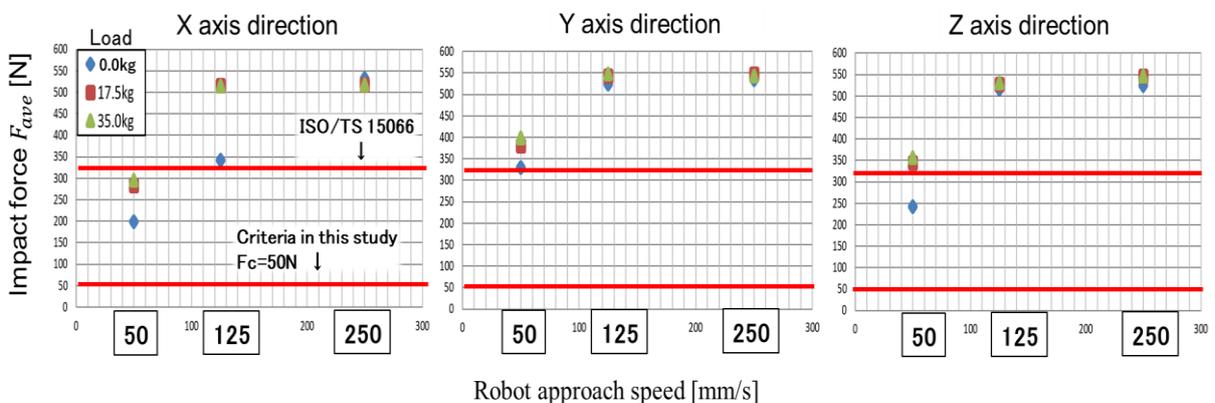


Fig.4-31 Step4 Measurement results in transient contact relationship between robot approach speed and transient maximum force

この実験結果を考察する。ISO/TS 15066 の痛覚耐性値を満足するためにはロボットの動作速度を 50 mm/s に機械制限設定して取り扱う必要が判明した。また、本研究で設定した痛覚耐性値 $F_c=50N$ については速度を落としても満足しないことも判明した。また生産性の面で 125mm/s 以上アプローチ速度が要求されることから、安全性と生産性を両立できる追加のアプローチをステップ5にて検討することとした。

4. 3. 6 リスクアセスメント Step5～リスクの低減と妥当性確認

安全性確保で最も難易度が高いと想定されるロボット(締結ツール)×治具またはワークとの挟まれ事象を想定し2つのリスク低減対策を行った。1つは締結協働ロボット誤作動時にツールとワーク側面の間に挟まれる事象である。図4-32に示すように、締結エリアでは(1)(2)に示す垂直動作のみの動作に制限する。また(3)に示すようにワークと十分な隙間を確保し水平方向へ移動することとした。そして次の締結ポイントにおいても(4)に示すように垂直動作のみの動作に制限し、挟まれ時の方向と事象を限定的にする対策を行った。

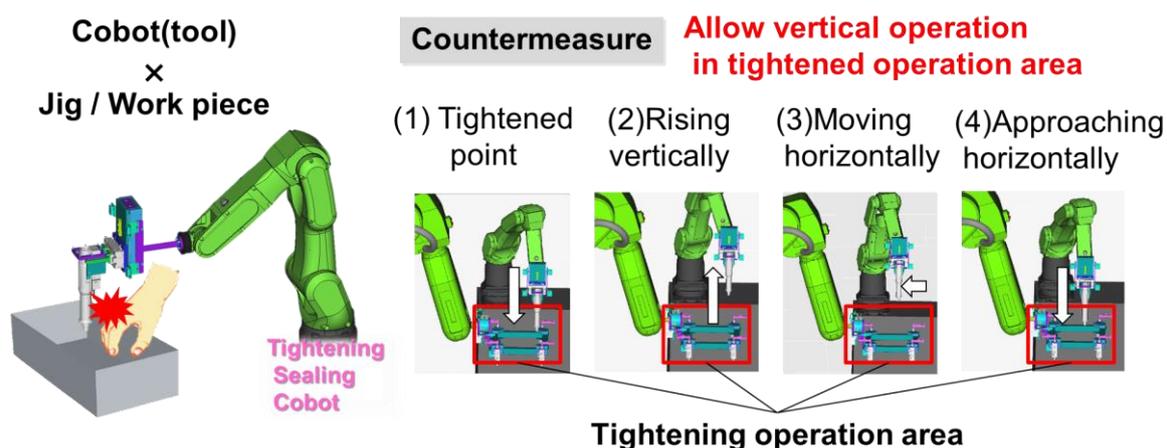


Fig.4-32 Step5 Countermeasure for Cobot(tool) × jig/work piece

2つ目の事象として締結時の押し付け力を確保したツールの先端とワークに挟まれる事象である。締結工程においては、締結の際に一定の締結押付力が必要であるため、ツール先端とワークの間に挟まれるリスクへの対応が必要となった。これに対応するために安全および品質の確保を行ったうえで、生産性向上のために締結位置へ高いアプローチ速度を実現できる新しいハンドの開発を行った。

ネジ締時の昇降動作 (Z 方向動作) については生産性の観点から 125 mm/s 程度の速度が必要のため運動エネルギーが大きくなる、接触検知から停止までの惰走距離が長くなる。そこで図4-33に示すように、先端に機械的コンプライアンス機構を採用することとした。

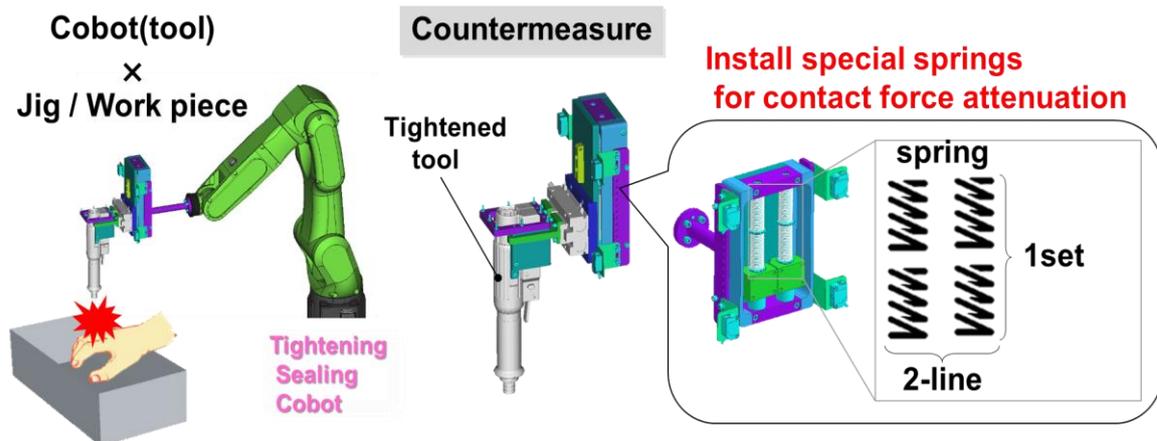


Fig.4-33 Step5 Countermeasure for Cobot(tool) x jig/work piece

手や指が挟まれた際にも、接触力を低減するために、ハンド部にバネを活用した簡便な機械的コンプライアンス機構を導入した。安全性と生産性が両立するために十分なストロークを有するバネを採用、接触検出から停止制御までを $PL=d$ 以上の安全制御で対応できる構成とした。

以上のリスクの見積もりと評価を行い、協働ロボットの動力源を危険源とする安全対策を提案しリスクの低減を行った。対策については安全性を $PL=d$ で保障できる構成とした。ロボット x 周辺の固定物、ロボット x ロボット、ロボット (締結ツール) x 治具またはワークのそれぞれのケースの対策を整理したものを図4-34に示す。

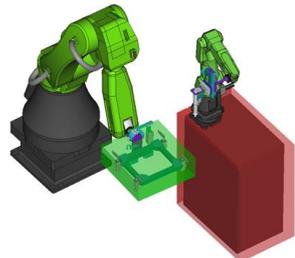
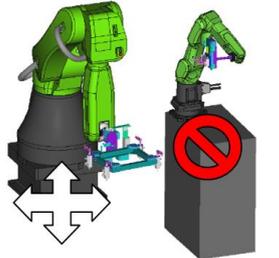
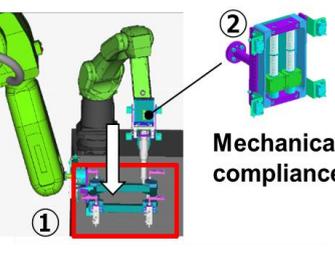
Cobot x Peripheral devices	Cobot x Cobot	Cobot(tool) x Jig / Work piece
 <p>Virtual space monitoring Controlled by $PI=d$</p>	 <p>Allow either operation Controlled by $PI=d$</p>	 <p>① Allow vertical operation Controlled by $PI=d$ ② Install special springs</p>

Fig.4-34 Step5 Countermeasure for risk reduction with human and Cobot operations for safe coexistence and collaboration

圧力と力の関係として狭い表面積での接触及び硬いロボットシステム部品との接触については接触面全体で不均一な圧力分布(圧力ピーク)が生じる。圧力の制限値が必要となる。一例として、手がロボットツール又はワークピース部によって挟まれるケースが想定される。しかしながら、妥当性確認方法が十分整備されていない状況である。本研究では、図4-35に示す、簡便な接触部位のテストピースを採用し評価を行う[103]。評価内容は挟まれ時の接触力測定と鈍的な機械的外力による傷害評価となる。

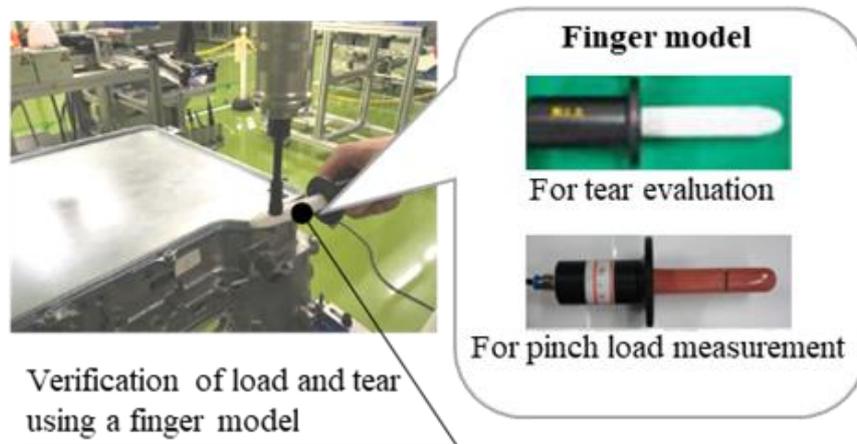


Fig.4-35 Step5 Measurement procedure for narrow point contact with sharp edge

手や指が挟まれた際の接触力を低減するために採用した機械的コンプライアンス機構部の有効性を検証するため、機能を有効、無効の場合で接触力測定を行った。図4-36に比較測定した結果を示す。機械的コンプライアンス機構部の機能を無効化した場合は過渡的な最大値が200N程度となる。機械的コンプライアンス機構部の機能を有効にした場合は、過渡的な最大値が20N程度に低減され、有効性が確認できた。

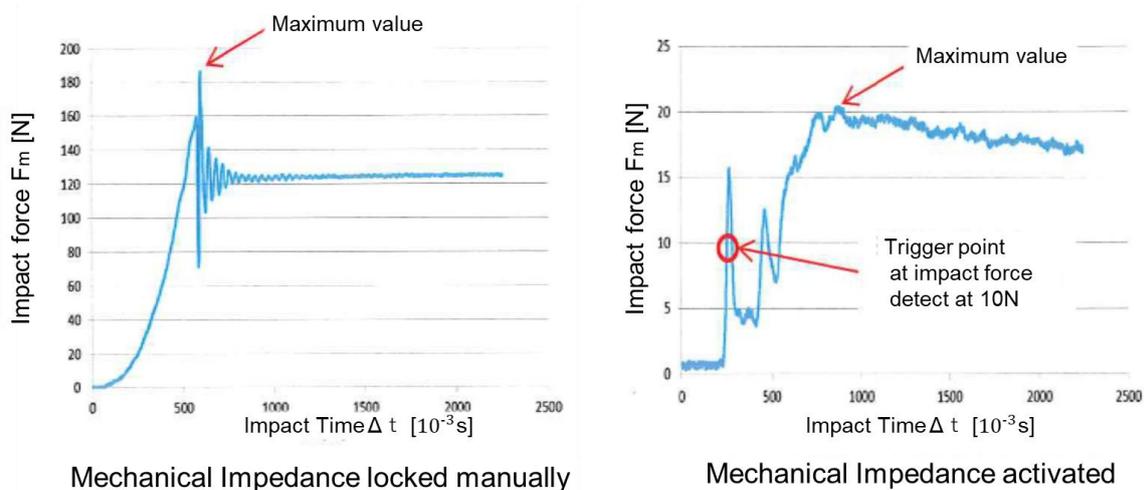


Fig.4-36 Step5 Measurement results of effectiveness for mechanical impedance device

手がロボットツール又はワークピース部によって挟まれるケースにおいて、簡便な接触部位のテストピースを採用し鈍的な機械的外力による傷害リスクの評価を行う[103]。機械的コンプライアンス機構の機能を有効、無効の場合で傷害リスクの評価を行った。この結果、該当機能が無い場合はロボットのアプローチ速度が 50, 125 mm/sの両方でテストピース表面層に傷害状態が確認できた。図4-37に示すように、コンプライアンス機能を有効にした場合は、125 mm/sにアプローチ速度を上げても表面部に鈍的な機械的外力による傷害が想定される状態が発生しないことを確認し有効性を示すことができた。



Mechanical Impedance activated

Mechanical Impedance locked manually

Fig.4-37 Step5 Cut Injury evaluation results of effectiveness for mechanical impedance device

締結押付力を 200N から 20N まで低減した上で、締結点へアプローチする際のロボットツール先端速度を Z 方向(上下)に関して 50mm/s から 125mm/s まで向上させることができた。以上から安全性と生産性が両立できることを確認できた。この結果を図4-38に示す。

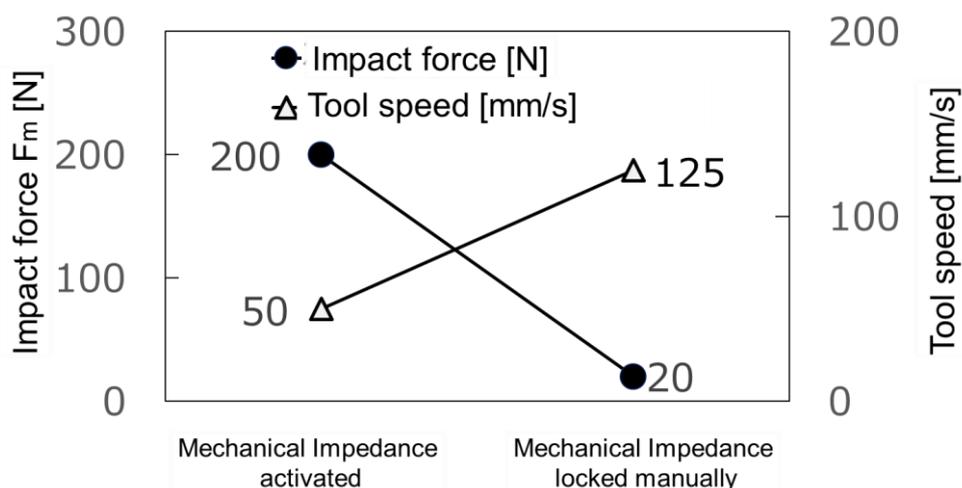


Fig.4-38 Step5 Evaluation for effectiveness of mechanical impedance device in relationship between tool speed and impact force

リスク低減の確認方法として、挟まれるリスクが最も高い人の指を模擬し、狭小空間での測定を可能とする試験指モデルを新たに導入し、安全性に関する妥当性確認を実施した。上記対策の結果、対策前 200N の力が対策後 20N となり、本研究で設定した痛覚耐性値 $F_c=50N$ を十分に満足できるレベルまで低減することが定量的に確認できた。また、ツール先端のアプローチ速度を Z 方向(上下)に関して 50mm/s から 125mm/s まで向上させることができた。

4. 3. 7 リスクアセスメント～使用者におけるリスク低減

協働ロボットを導入するにあたり、リスクアセスメントの考え方とステップを5つに分けて示進めてきた。本節では使用者におけるリスク低減方法について述べる。

ステップ5までの段階で妥当性確認をした結果、リスクレベルが4以上の場合には保護対策を実施してリスク低減を図りステップ1から再度検証を行う必要がある。リスクレベルが3以下の場合、以下の使用者におけるリスク低減が必要となる。

- ・作業管理と作業手順における残留リスクの明示
- ・保護具の使用方法和指示
- ・教育と訓練、資格管理
- ・以上の運用状況の文書化してエビデンスを残す

本研究では定常作業時の残留リスクレベルが2以下、非定常作業時の残留リスクレベルが3以下(ティーチング、保全作業)となるため定期的な教育、点検に関わる内容を明示することとした。

4. 4 実ラインへの適用と評価

4. 4. 1 開発ラインの概要

人とロボットが作業分担し、並行処理するために、図4-39に示すように、人を中心に作業が遂行できるように治具協働ロボットと締結協働ロボットを配置し、作業者移動作業がミニマムになるように配慮した。

これにより治具協働ロボットが作業者に合った位置・姿勢にワークを動かすことができ、個人差によるやりにくい作業の軽減を可能にした。従来の専用設備も多く動線も複雑であったレイアウトを、協働ロボットを導入することで人を中心に汎用設備を配置し効率的な共存・協働作業ができるように配慮した。

以上の工程集約を行ったことで作業指示の表示モニタ(あんどん)を1か所に集約でき、作業者が迷うことなく手順の確認が可能となった。なお、作業指示の表示モニタ(あんどん)は簡便に構成でき、現場作業者が内容の改善を行えるように開発・導入を行った。

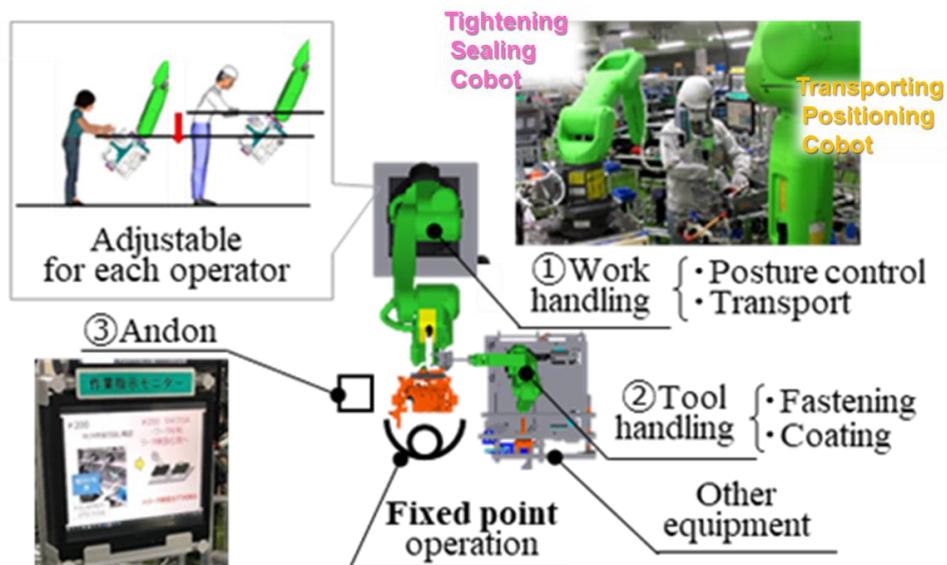


Fig.4-39 Developed versatile and human centered Cobot cell arrangement

4. 4. 2 適用した共存・協働作業

共存・協働作業ができることで、人とロボットが同時に同じ作業領域で並行作業ができる。人とロボットの交わり方で考えた場合、治具・搬送ロボットとは協調作業、締結・塗布ロボットとは共存または協業作業を実施することとなる。

その作業の一例として側面の部品取り付けと締め付けは作業者が担当し、HV インバータのケース上面のネジ締作業を締結・塗布ロボットが担当する分担の実際を図4-40に示す。

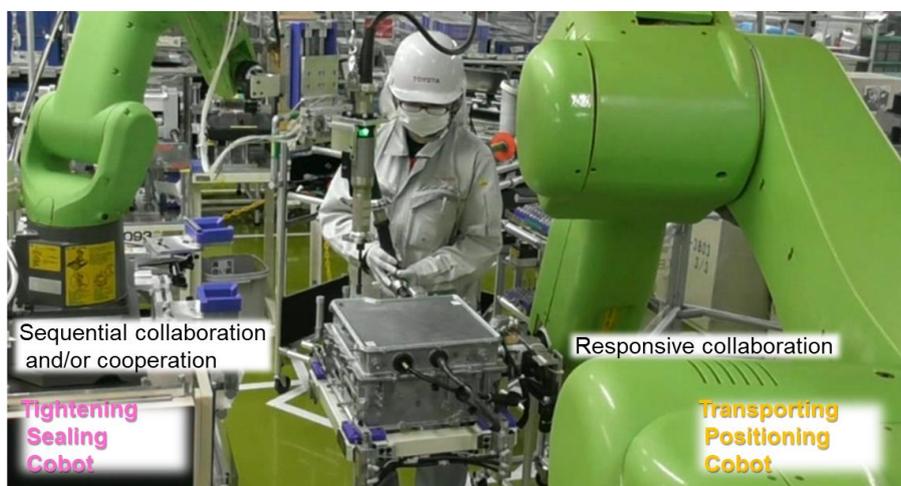


Fig.4-40 Developed and installed safe multi-level collaboration for tightening and assembling with human and robot parallel process

図4-40において左側に位置するロボットは締結・塗布作業を協業及び協調作業で遂行する。また図4-40の右側に位置するロボットはワークを保持する治具の役目を担っており、作業者とワークを介して比較的長い時間接触状態での協調作業を遂行する。

治具・搬送ロボットを積極的にワークの位置、姿勢を出すためのツールとして活用について述べる。作業者の身体的特徴(身長、体形)にあわせて最適な作業性が提供できる。また作業内容に応じて、適切な位置、姿勢が提供でき作業性の向上に貢献できる。やりにくい作業やエルゴノミクスへの対応を実施した。汎用性の高い可動できる治具として、作業性にあった位置・姿勢を提供できる状況を図4-41に示す。

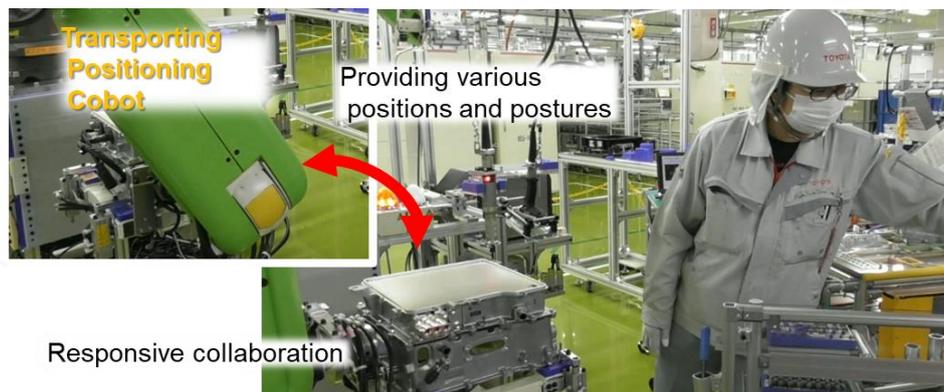


Fig.4-41 Providing suitable positions and postures for improving ergonomics and workability with responsive collaboration level

締結・塗布ロボットを作業者との協働作業とくに、ワークへの介入タイミング、作業領域が同じである協調作業の有効性もあわせて検証した。今回対象とした補給パーツラインでは古い設計の製品も扱うので、ワイヤーハーネスを押しえながら締結するような気づかい作業があった。作業者がワイヤーハーネスをかき分けて、ロボットがネジ締めを行う協調作業の実際を図4-42に示す。



Fig.4-42 Providing responsible collaboration for high level combination task with positioning Cobot and tightening Cobot

4. 4. 3 生産性向上の実証結果

重量物の搬送、ワークの上下、左右反転等のエルゴノミクスとしてやりづらい作業、また複合的な作業で気をつかう作業が存在することを示した。これらの作業者にとって負担感がある作業のプロセス数を低減することに取り組んだ。

図4-43にその取り組み結果を示す。治具・搬送ロボットを積極的にワークの位置、姿勢を出すためのツールとして活用した。やりづらい作業のプロセス数については約60%の低減が確認できた。また、締結・塗布ロボットを作業者との協働作業のなかで協調作業を実施することができ、トルク監理やワイヤーハーネスをかき分ける作業が必要なネジ締め作業の自動化、共存・協働化が可能となった。気をつかう作業の低減効果が約61%確認できた。

共存・協働化することで、コンパクトで工程集約することが可能となった。作業手順の提示が一元化でき、作業者にとって安心できる作業指示のしくみができたことも効果として挙げられる。

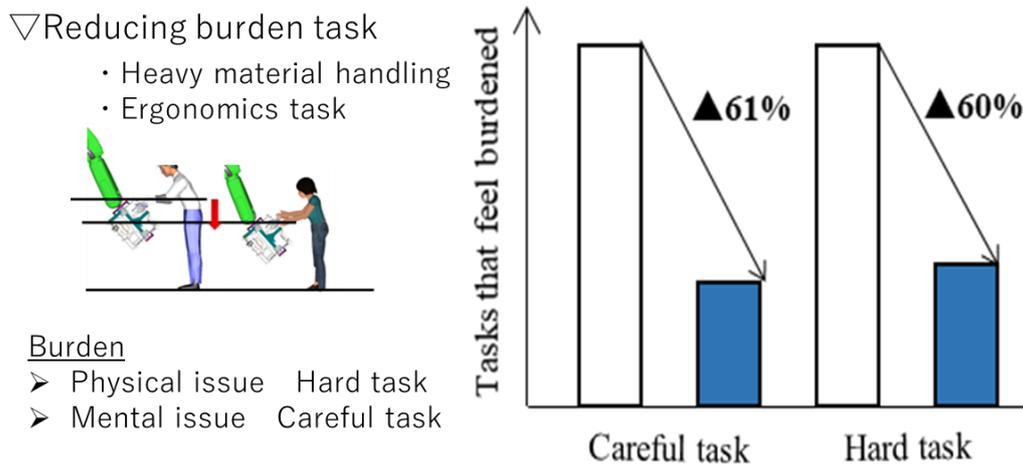


Fig.4-43 Evaluation of reducing burden task number as ergonomic and careful process

大量生産に対応した場合、評価指標として能力に着眼が向けられサイクルタイムが指標として使われるが、少子高齢化、多品種少量、変量生産への対応を踏まえた場合の生産性指標として作業手順数を評価指標とした。

本研究で取り上げた、HV インバータの補給パーツラインでは全てのプロセスを人作業で従来対応していた。このラインに共存・協働作業の概念を取り込み、人とロボットの作業分担した結果を図4-44に示す。ネジ締め作業及び付随するトルクチェック作業などを含む自動化の効果が約30%程度であった。部品の搬送、反転作業などを含む人と共存・協働化約14%となった。合計で約44%の手順数の削減が確認できた。

残る作業手順は現時点での技術と経済性検討の観点で全体の約56%は人の作業で実行することになった。この作業の内訳は35%が正味作業、65%が付帯作業となった。この付帯作業の中には部品の取り回しやピッキングなどの作業等が含まれる。

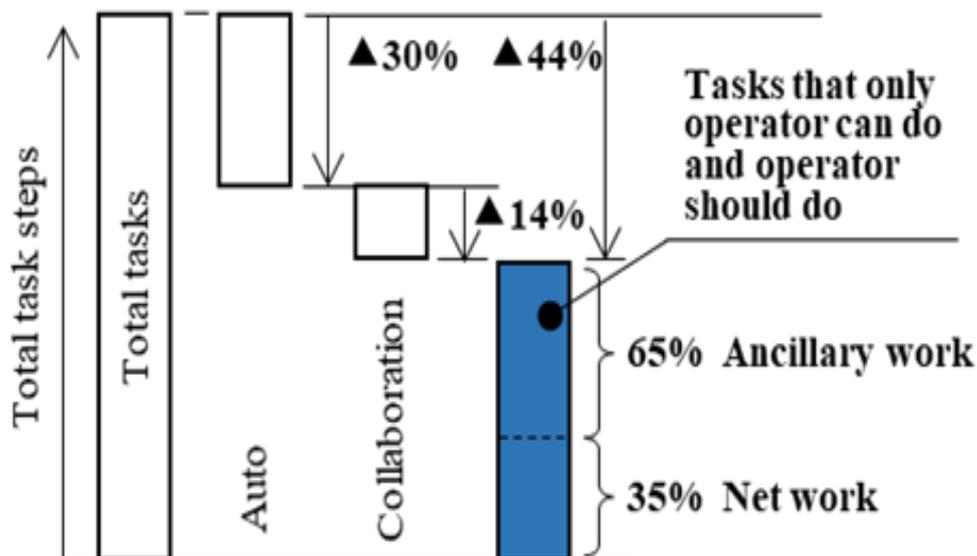


Fig.4-44 Evaluation of reducing total human task number by automation, coexistence and collaboration approaches

4. 5 実ラインでの実証結果の考察とまとめ

4. 5. 1 実ライン適用の振り返り

本章では、共存・協働作業の実用化開発および工程集約による作業者負担軽減および作業プロセス低減効果を明らかにした。

気をつかうと感じていた部品やツール選択に関する作業プロセス数を61%、ワークの取り回し作業などのやりにくい作業プロセス数を60%低減できた。このことから、協働化は安全、エルゴといった肉体的に負担がある作業だけでなく、気をつかうなど心理的な面についても有用な手法であることが明らかとなった。負担感が残った作業の一例では、3つ以上の部品を組み付ける共締め作業があげられる。このような作業を振り返ると製品デザインレビューとセットで製品設計、工程計画の完成度を高める考察がさらに必要である。

全作業プロセス数は、44%低減できることが明らかとなった。残りの56%が人作業となった。この人作業をさらに分解すると、35%が正味作業、65%が付帯作業となった。この付帯作業の中には部品の取り回し(ピッキングなど)作業等が含まれる。

多くの種類の部品を人は器用にかつ素早くハンドリングし、組付けできる。これをロボティクスで実現するためには、ビジョンによる認識技術と手先のセンシング機能の融合、手と腕と

足の協調動作、さらには作業遂行のための計画と学習など高度な能力を持つ実用的なロボティクスの開発がさらに必要である。

実施状況を振り返ると、自動化、共存化、協働化を現時点の技術で最適化し、人の作業と合わせて分担する工程編成となった。自動、共存・協働化の技術がさらに進めば、この作業分担比率が変化していくと推察されるが、当面は製造プロセスの中で各作業モードが混在し、ベスト・ミックス化された工程編成が主流になると推察される。

今後は自動、共存・協働の各モード移行に対応した安全技術の開発が望まれる。自動化モードでの安全対策、協働化モード時の安全対策を使い分ける、または両方とも兼ね備えた安全技術の進化が期待される。

共存化において人が誤って危険源に近づいた場合、前もって速度を落とす、回避する、止まるといった動作に移行できるようにすることが更なる生産性向上のために必要である。そのため、人の動きや行動を理解する仕組みが必要となる。協働化の場合、ロボット、ツールと触れ合う機会が多くなるため、接触安全のアプローチ[104]も必要となる。

いずれの場合でも、ツール、ワーク、治具との挟まれに対する安全対策が最も難しく、適用毎に工夫が必要となる。安全対策のアプローチはロボットメーカーだけでなく、システムインテグレータへの期待[105]がより大きくなると推定される。

次に、安全基準の観点で考察すると、一般的には保護具による安全性確保が比較的容易にできるケースが多い。例えば頭部であればヘルメット、眼部であれば保護メガネなどがその一例である。

今回の適用では手先がツール、ワーク、治具との間で挟まれるリスクの出現頻度が高く、切創などの災害リスクに対応としては保護具でリスク低減できるが、該当部位の挟まれに対するリスク低減対策と安全性評価を独自に行った。

手先の挟まれに対する協働安全に関わる研究[106]、開発は始まったばかりであり、更なる検討と考察が必要である。

4.5.2 今後に向けた取り組み

今回の開発における振り返りと今後の活動を安全および生産性の観点でまとめる。安全面において協働化を行う場合、ロボットおよびツールと触れ合う機会が多くなるため、接触時の安全確保のアプローチを実施し安全評価とその確認を行った。今後の取り組みとして、ツール、ワークおよび治具は工程ごとに異なるため、本開発で実施したようにユーザが安全対策とその効果確認を行う必要がある。

今後は、多くのユーザが確実に確保できる汎用的な安全対応技術の開発および、これに対応した規格や安全確保の仕組みを産官学で協力し整備が必要である。

生産性において協働ロボットは産業ロボットと比較し導入コストが高く、投資回収に時間がかかること、現場で容易に改善、改造が行いにくい課題がある。市販の協働ロボットだけ

でなく、ユーザがオーナーシップを持ちながら適用工程に合わせて必要なアクチュエータや安全機器などを選択、構築できる新しい協働ロボットシステム開発が必要である。

今後はさらに車両開発サイクルを短縮することが急務であり、お客様のニーズに対応したモノづくり技術開発の早期具現化に取り組んでいく必要がある。その際に、今回の開発で行った人とロボット作業のベストミックスをユーザが構築できる仕組みづくりが基盤技術になると考えている。より人と機械が協調し、共に能力を高めあうための共進化にかかわる開発が必要である[31]。

4.5.3 まとめ

第三の S-RQ としてモノづくりにおいて実現できたしくみや手段が実際の社会に定着でき、有効性を示すことができるのか？という問いを設定した。学術的研究課題として実際の生産ラインで安全性と助け合いによる生産性が両立できることを実証した。

本章では第三の S-RQ に対して安全な人との共存・協働ロボットシステムの実生産ラインへの適用を実施しその有効性を示した。研究テーマと対策として①社会定着のための安全検証と評価のしくみ構築と整備、②モノづくりにおける自動、共存・協働の特長を活かした人とロボットの作業分担計画、③実ラインでの安全性・生産性両立の実証とその効果について明らかにした。

ロボットとの協働化を実現するための安全規格制定をすすめ、市販のロボットに安全対策を実施し、安全性評価とその妥当性確認の手段と手順を具体的に提案した。また、人とロボットの作業分担に自律性という尺度を導入し、人の負担感とタスクレベルで整理する方法を示した。人への負担感のある作業を60%程度、作業プロセス数を44%低減できることを実際の生産ラインで実証した。学術成果は研究業績目録の業績(6)に対応する。

第5章 今後の展望

5.1 人とロボットの安全なふれあいと助け合い

本稿では人とロボットが安全な直接的な助け合いを目的に、モノづくり分野におけるロボットとの共存、協働化に関わる安全基準の提案ならびに安全な接触検出と停止を可能とするロボットの設計手法を提案した。開発したしくみを自動車の製造ラインに適用し人との協働化の実証評価を行った。

共存化、協働化のメリットが出せる工程はまだまだ限定的でこれからのモノづくりのために、更なる研究、開発が必要と感じている。得られた技術を真に社会へ広く、その効果を展開するため今後の研究、産業応用開発の方向性、展望を設定した3つの学術的研究課題に分けて整理したい。

第一に人との協働を深化させるための安全性基準の充実があげられる。適用をより広めるための傷害モード分析と考察、接触時の挙動を踏まえた安全基準の整備が必要である。

第二に将来の共存・協働ロボットの展望として、意図しない「挟まれ」対策、人の感覚を取り込んだセンシング研究・開発の充実が必要である。

第三に人とロボットの共進化社会への期待として自動、共存・協働のベストミックス(自働化の進化と深化)、安全性と生産性(速度制限)の更なるレベルアップ、人の動きの把握・行動の理解をしたロボットの自律性に関する研究・開発の充実が必要である。

上記3つの観点で具体的な研究の方向性、今後の展望の構成を図5-1に示す。

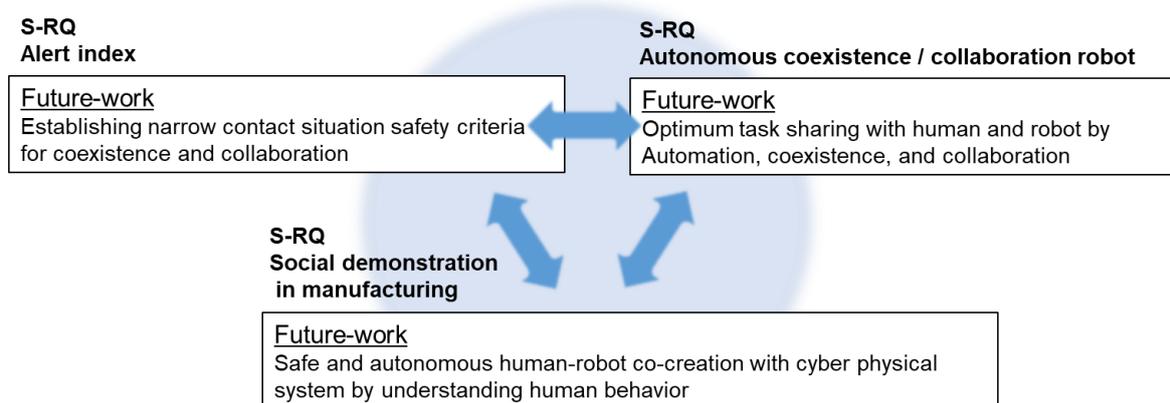


Fig.5-1 Future-work for enhancing human-robot collaboration in industry fields concerning sub-research questions

5.2 人との協働を深化させるための安全基準の充実

人とロボットの安全な接触を想定した場合に、ISO/TS 15066では 1cm^2 以上の接触面積に限定して規定している。これは比較的鋭利なものや、硬いものへの接触については、安全性の確保が難しいためである。食品業界など柔らかい製品を扱う製造分野では適用ができるが、金属系の加工、組付け業界では適用範囲は限定的となる。

共存・協働によるモノづくり領域の適用範囲を広げるためには、接触する形状、大きさを規定し、これに基づく傷害モード解析、その受容強度、およびその測定、評価方法を充実させる必要があると考えている。図5-2に一般的な六角ボルトを人に押し当てたことを想定した場合の圧力分布を測定した状況を示す。部分的な圧力が接触側の形状に依存して高い部分が観測される。面圧や応力集中に関して、医学領域との連携をすることで傷害モード解析とこれを踏まえた安全評価基準の構築と整備が必要と考える。

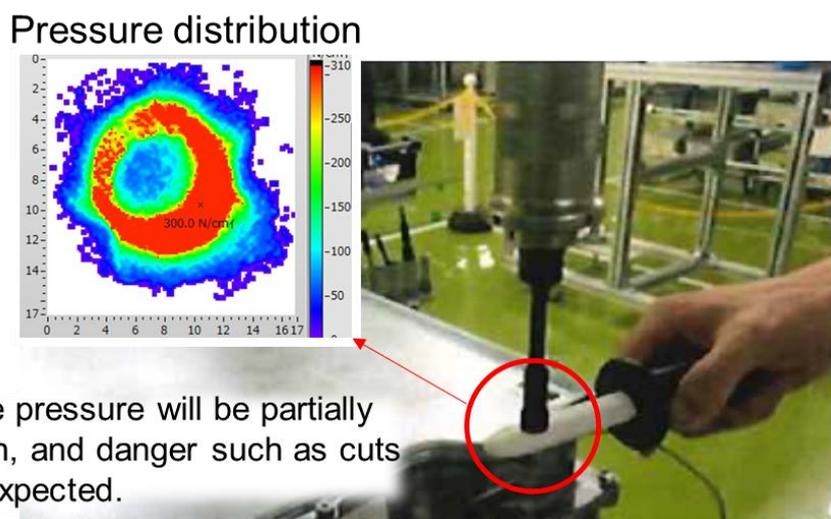


Fig.5-2 Future-work for reducing cuts risk by contact hard work piece, tool and peripheral devices

接触状態を形状、大きさで整理し、傷害モードを踏まえた耐性値として提示され、簡便な妥当性確認方法を構築することが必要と考える。

本研究では、比較的鋭利な部分が少ないワークを選定し、エッジ部の挟まれに対するリスク評価を行った。指の柔らかさ、形状を模倣した試験片を用いて実際に挟まれ状態を作ることによって安全評価を実施した。あわせて、挟圧力の測定も指の形状を模倣した計測器を用いて安全性評価を行った。

モノづくり領域で協働ロボットを活用した場合に挟まれる部位として頻度も高く、残留リスクが残る部位が手、指の部位である。加工点にも近く、リスクアセスメントを実施した場合、挟まれる可能性が多く残る傾向がある。また、リスク低減として保護具の着用なども想定される

が作業性両立面で困難なケースが多い。この領域の研究は始まったばかりで[106]、更なる検討と産業応用が必要である。

応力集中時の安全性に関して、簡便に妥当性確認方法の充実が必要と考える。接触する面積、形状が異なると、人が痛みを感じる前に受傷してしまう可能性もある。一般的にそのような場合は手袋など保護具をつけて作業することが前提となるが、サービスロボット等は保護具を常時着用することが難しいことが想定される。そのため、刃物のような明らかに鋭利であるものは前提としてロボット側には持たせないとして、鈍的な外力に対する傷害モードを整理し、これに対応した規格類の整備と安全対策と妥当性確認の充実が期待される。

安全性評価のツールの開発も並行して実施し、傷害モードに応じた受容強度の解明と評価方法の標準化が必要と考える。接触部位の局所的な挙動やメカニズムを傷害モードごとに明確にすることで、ロボット側で可制御な接触姿勢、速度が考えられる。この場合、挟まれ状態を想定していても、ロボットのアプローチ方法で人の接触状態が大きく変化することが想定される。

製造業、および日常のサービスロボットの活用シーンで共存化、協働化した際に最もリスクアセスメント上で残留リスクとして想定されるものは手先とワーク、ツールとの挟まれである。手先が挟まれる事象を想定して保護具をつける方法もある。しかしながら本質的な安全、作業性の確保への対応が必要となる。

手先の傷害モードは一般的に表層部挟まれ、筋肉部挟まれ、骨部も含めた全体挟まれ事象が想定され、接触時にスティックスリップ、回転動作などが想定される。どの現象についても今後の研究が期待される。人の皮膚表面の摩擦力や状態にも依存すると考えられ、人との接触現象をより分類し、安全な接触のしかたやロボット及びハンドの表皮材質なども研究する必要があると考えられる。

サービスロボットシステムの適用の可能性が高い高齢者、幼児、障害者などは痛覚耐性値が低いことが予測でき、これらの被験者のデータを測定し、対応した規格類の整備も必要である。

今回明らかにした痛覚耐性値は制約された条件下におけるものであり、適用できる範囲は限定されることが予測される。今後、安全設計指標としてより広い領域を整備し、信頼できるものにする必要がある。そのためには被験者数を増やすだけでなく、人体のシミュレーション[107]なども活用して痛覚耐性値とその記述方法を更に明確にする必要がある。

5.3 将来の共存・協働ロボットの展望

本研究では人とロボットの接触を機械的インピーダンスマッチング問題としてとらえ、人の痛覚機能を感じ覚として取り込んだロボットシステムの設計手法を提案し、人との安全な接触が可能であることを示した。実際の作業ではツール、ワーク、治具との間に挟まれるリスクに

ついてリスク低減対策が必要で、ロボットだけでなく、ツール部にも機械的なやわらかさを持たせることで安全確保をした。

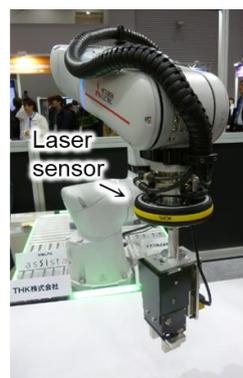
市販の協働ロボットの現時点での性能と機能では、ツール先端のアプローチ速度を50 mm/sまで落としても挟圧力が200N以上発生することが明らかとなった。そこで安全性が確保するために独自に開発した機械的コンプライアンス機構を採用することで先端のアプローチ速度125 mm/sまであげ、かつ、挟まれ力を20Nまで下げられることを示した。

手先部に安全対策を織り込んだアプローチは近年多くの手法が提案されている。具体的な事例を図5-3に示す。接触規範のアプローチとして本論文でも機械的コンプライアンス(ばね等)を採用したが、簡便なユニット構造として提供し接触力緩和する提案がある。また、非接触の規範の事例として、手先にレーザ検知装置などを装着し、簡便な構成で接触回避するシステムなども2019年国際ロボット展(IREX2019)にて出展されている。

ツール先端部の接触を考慮し、柔らかさを持たせたロボットシステムの活用がモノづくり分野で期待される。ツール先端速度が250mm/sで意図しない接触時の安全が担保できることが必要と考える。生産性向上のためにはアプローチ速度を上げる必要があり、安全性確保ができるツールを含めたロボットシステムの実用化が期待される。



Contact type (THK)
➤ Mechanical impedance attenuation for hand / fingers



Non-contact type (SICK)
➤ Laser sensor detection for hand / fingers
➤ Controlled PL=c

Fig.5-3 Softness contact and non-contact detection for robot tools and the enhancement of the market in IREX2019 Tokyo

ロボットの柔らかさとして衝撃吸収素材を採用し、動作制御の組み合わせた研究[108]が実用化段階になった。衝突安全性確保に注目し、人間の頭部衝撃耐性値を安全基準とした人間共存ロボットマニピュレータ[109]などがある。ロボットの機能として接触後の回避モーション生成や挟圧力緩和方法する方法なども有効な方法と推察される。

ロボット自身によりやわらかさを持たせることで機械的インピーダンスマッチング問題とセンシングを両立させようとする試みが活性化されている。多くの検討と議論がなされている

[110][111][112]。特にソフトな動きを実現できるアクチュエータへの期待は大きく、軽量・柔軟で、環境を傷つけることが無いことが特長として指摘されている [113]。今後のロボティクス・メカトロニクス分野での応用に向けて従来のロボットでは実現が難しかった柔軟な機構、しなやかな動作、知的な振る舞いを目指すことが必要となる。

本研究では、力を観測することで安全な停止をすることを試みたが、接触してからの変位、速度を観測、制御する方法も考えられる。第2章にて痛覚耐性値を変形速度と変形量に基づく統一的記述方法についても提案した。得られたデータを整理し、スティーブンスのべき法則に当てはめてみると、痛覚強度は最大変形量と最大変形速度のべき乗(1.5乗)の和で記述できる可能性を示している。

従って接触部位と接触タイミングを検知し、人との接触時の変位と速度を観測することで安全制御できる可能性を有している。ソフトロボティクスの研究とあわせて、可観測、可制御の視点で新しい安全な接触検知とロボットの自律制御の研究と産業分野での展開も期待される。

本研究では人とロボットの安全性と生産性の両立を目指し、人への作業負担と難易度の関係から人とロボットの作業分担を決定した。それぞれの作業プロセスを整理し自動、共存・協働作業を選択した。

モノづくり分野全体でとらえた時、製品設計、工程設計の工夫とロボティクスの活用を同時に進める必要がある。特に人の作業付加価値向上という指標に着眼し、その指標が低く、作業負担が高い分野へ積極的に取り組むべきと考える。特に物流の作業領域では社会的要求も高い。ロボティクスの有効性が示せる分野であり実用的な技術開発と活性化[114]が必要と考える。

ロボットと人との協調技術とあわせてロボットの頭、目、手、腕、脚を統合化する必要がある。モノづくりの中で負担感が高い仕事をロボットと分担することで人がより付加価値の高い仕事へシフトできると考えている。ハンドリング作業の中で重要な技術は、ハンド技術だけでなく、その認識のためのビジョンとハンド技術、さらには移動系のしくみとセットで研究、開発が必要になると考えている。

本研究の共存・協働化の技術が安全面ではベースになると考えており、そのうえで手先の安全と制御の技術が重要なテーマになると考えている。ピッキング計画と移動体の経路計画との融合も必要となる。

今のロボティクス技術を用いて産業界で実行可能な比較的難易度が低い領域は、工程順序や作業制約で自動、共存・協働を使い分ける形が主流になると推察される。従って各動作モードの遷移をいかにスムーズにできるかが技術課題と考える。また、今回の適用ケースでも存在した作業として、人とロボットが同じ領域、同じタイミング助け合うことで作業が完結できるケースも確認できた。このような領域は今後も共存・協働化が有効な手段として今後も活用されると推察される。

作業負担、難易度も高い作業のケースは製品、工程設計段階で何らかの方法で取り除くか別の手段や方法で対応している。今回の適用には対象となる作業としてワークの反転、搬送作業が共存・協働化で改善されるケースとなった。特に協働ロボットを治具として活用する方法は比較的動作速度も低く抑えることができ、効果が見出せた事例と考える。このような活用事例が産業界で増え、社会定着できるように進めていく必要がある。

作業分担の考え方として、1章で人とロボットが意思をもって自律的に助けあい、物理的な支援を行うことができる仕組み」で提案した。実ラインの工程計画を検討するうえで、人のインタラクションのレベルの観点では人に対するインタラクティブな負荷と置き換え X 軸に尺度を設定、タスクの難しさを Y 軸にその尺度を設定した。タスク環境の複雑さについては本論文では定型作業を対象とするため、その複雑さのレベルは低いと考えた。以上の観点を踏まえて、人とロボットの作業分担を図5-4に示すように作業負荷とタスクレベル(難易度)の観点で整理を実施した。

今回は負担度が低く、難易度が高い作業は人で対応することで人作業の付加価値向上に取り組んだ。タスク環境の複雑さのレベルが高い非定型作業やより創造的な仕事へのロボティクス支援を想定した場合、ロボットシステムの高度化、知能化を進めていく必要があると考える。今後は作業負荷、タスクレベル、作業環境の複雑さの3軸の尺度でロボットの自律性を検討することが必要になる。

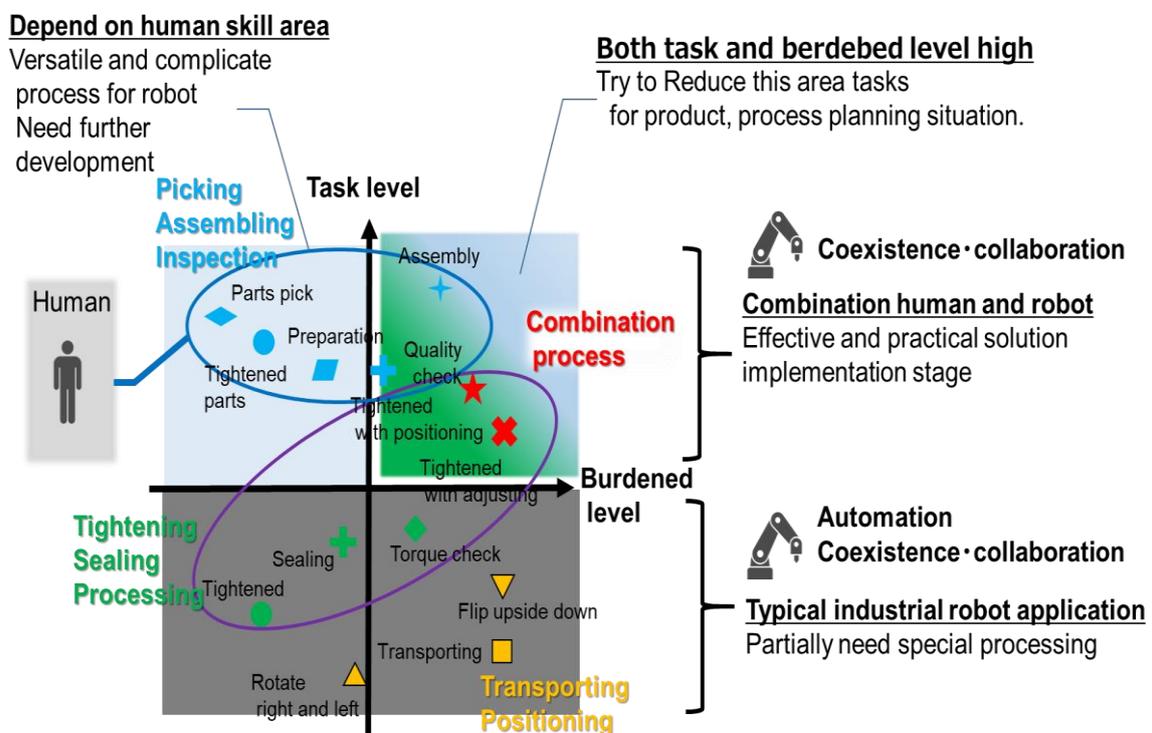


Fig.5-4 Robotics directions for suitable task area analysis and combination manufacturing with automation, coexistence and collaboration

本研究の適用事例から全てが人の作業を自動、共存・協働化の観点で整理し、作業プロセス数の低減を指標に生産性向上の効果を評価した。自動化の効果が約30%、共存・協働の効果が約14%という結果となった。今後の技術革新で人作業が共存・協働へ、共存・協働が自動へとシフトしていくことが推察される。その際に重要なのは図5-5に示すように、人を中心にとらえた働き方とすること。自動、共存・協働、人で実行するメリットを意識して作業分担、編成を計画すること。さらには自動、共存・協働、人の各モードの遷移状態に着眼しスムーズに移行できる工夫や配慮が必要と考える。

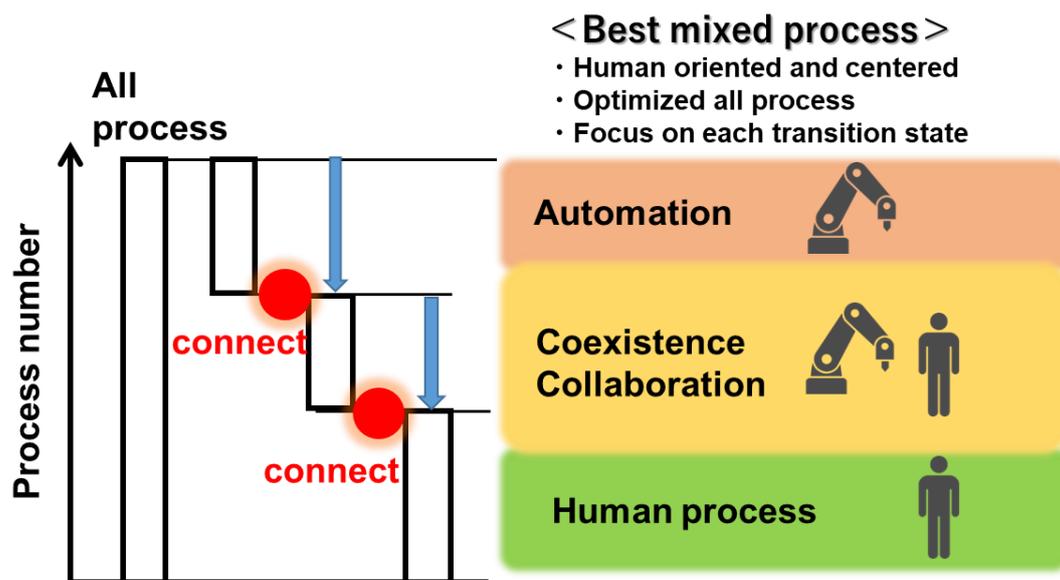


Fig.5-5 Best mixed process with automation, coexistence and collaboration with human process oriented and centered

5.4 人とロボットの共進化社会への期待

人の動きを正確に把握することができると、ロボットとの接触を事前に予測でき、回避動作や接触した場合のリスクを軽減できることが期待される。この方法であればロボットの動作速度を安全な状態が担保でき、安全、安心で生産性の高いモノづくりが期待される。サービスロボットの領域においても人の動きが予測できれば積極的な支援ができることも期待できる。これらの研究も今後産業応用に必要である。

具体的な研究例として、非接触の人検知技術としてレーザスキャナを用いて人の位置を推定し、速度を制御することで保護間隔距離を維持する研究[115]、ロボットの可動範囲と位置決め誤差の推定から人との衝突確率と重篤度の関係性を評価した研究[116]、クラウドベースのプラットフォームを活用しロボットの経路計画ツールを用いて人とロボットの最小保護間隔距離を計算方法に関わる研究[117]、ロボットと人との幾何学的な動きを考慮しより正確な保護間隔距離の計算に関わる研究[118]などがある。どの研究も安全性を確保しつつ、よ

り高い協調作業を構築するために人検出とあわせて人の動きも認識することが重要と位置付けている。

近接領域の人検知方法として赤外線センサを利用した研究[119]、超音波センサを利用した研究、レーザスキャナ及び準ミリ波帯電波センサを用いて作業空間における保護間隔距離の縮小効果を評価した研究[120]、人の手検出を目的とした静電容量センサ、複数の赤外線センサを用いた最適配置配置方法が議論されている[121]。

複数のカメラを用いて人の位置と姿勢を計測する研究[122]、複数のカメラで3D計測を行いハザードエリアに人が侵入したことを検知する市販技術[123]などがあるが、オクルージョン問題など信頼性に関わる問題がある。

最近では人検出のために画像センサ、IMUセンサを補助として取り付けセンサーフュージョンしている事例がある[124]。しかしながらレーザスキャナは環境要素で信頼性を低下することが問題である。多くの研究がおこなわれているが、ロボットの安全機器を組み合わせただけでは画期的なブレイクスルーの可能性が低い。

人の動きをより正確に動的に把握するために、人の各関節へIMUセンサを取り付け、人のダイナミクスモデルとフィッティングすること手法が提唱されている。共進が活かされるシーンを考えた場合に、多くの領域、適用が想定される。社会的なニーズとして、製菓、コンビニに象徴される小売業、モノづくりの現場では物流領域におけるモノのハンドリング作業を通して人と機械の協調に関する研究がすすめられている[21]。

モノづくりの領域で考えると人の行動を理解し、ロボット、AGVなどの機械類からデータを取得しサイバー上へ再現させることができる。得られた結果を蓄積し、ここから行動の最適化やAIを活用した判断ができ、これらのしぐみの充実が今後期待される。これらの技術がロボットの制御技術と融合することで、より高いレベルの共存・協働を達成できると考えている。そのためには、確率的な安全レベルをPL=dレベルまで確保するために冗長センサ系で構成するなどの研究、開発が必要である。

積極的な共存・協働進んだ場合、人の動き特に、人の意思や作業意図を理解することが進んでいく。またロボットの動きを人が間近で観察することができ、ロボットの動きから人が気づきや学びが発生することが想定される。モノづくりのあり方として、共存化、協働化につづく共進化と位置付けられる[21][30]。その先には、ウェルビーイングな実現として労働者の健康から幸福も考え合わせるような活動に軸足がのせていけると考えている。

共進化の段階でこれらの事象をデータ化することで、定常的な動きだけでなく、非定常な動きや、これにともなう行動計画、作業計画がどう対処したか、どう対処すべきであったかなどを検討できる研究領域が考えられる。

人とロボットが空間的に近づくことで生産性の向上、作業分担が進む共存化、より積極的な物理的支援が可能となる協働化の実用段階に入った。相互に理解し合い、学習を共有し、相互研鑽、深化していく共進化が今後より重要な位置づけになる[125]。

それぞれの強みを活かしたモノづくりやサービス支援のあり方の研究と産業応用が必要と考える。図5-6にそのロードマップを示す。

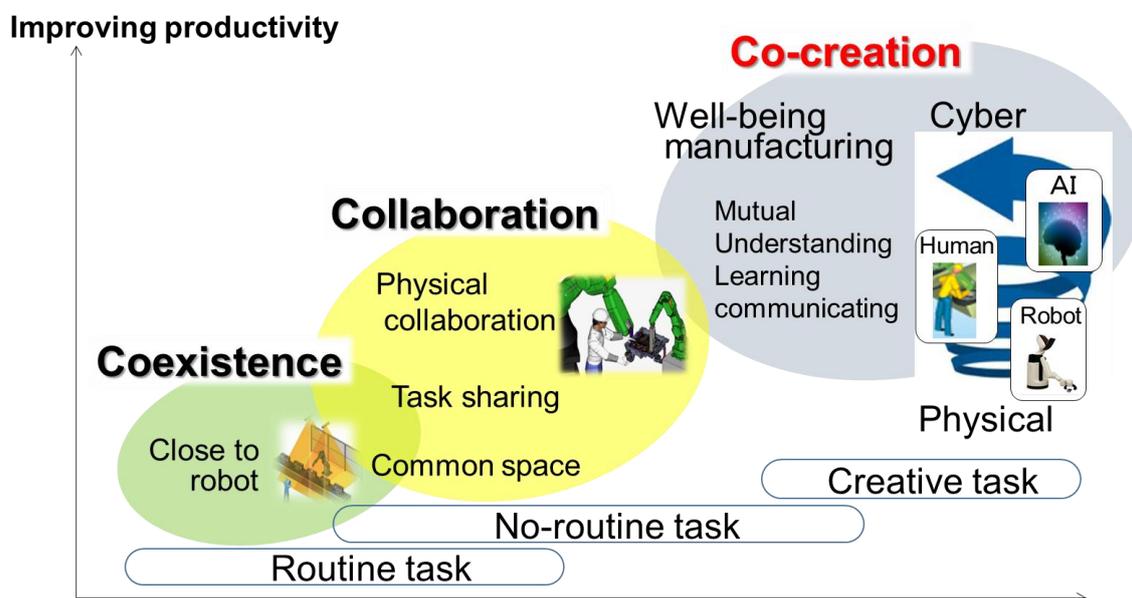


Fig.5-6 Roadmap for improving productivity by coexistence, collaboration and co-creation by employing human-robot cyber physical system with AI applications

5.5 まとめ

人とロボットの共存・協働のための安全技術、人の物理的な動きや意図の積極的な認識、理解ができる技術が進み、人との共進化につながる将来像を示した。また、サイバー上で綿密に作業計画や学習強化した結果を実世界で享受できる日も近くに来ている。

人とロボットの共進化が進み、モノづくり分野でのプロセスが正確に把握でき生産性向上に貢献できることが予測される。いままで暗黙知であったノウハウや経験が形式知化され、設計、開発といった創造的な仕事も支援を受けて完成度が高まる日がいち早く実現できるように研究・開発活動を進める必要がある。

6章 結言

本研究における主たる研究課題(以下、Main-Research Question: M-RQ)を産業用ロボットの活用のモノづくり分野に着眼し、1.4節で人とロボットは安全にふれあい、共存・協働作業で助け合うことはできるのか?と設定した。学術的研究課題として自律性を持って安全性を確保し共存・協働作業ができるのか?と設定した。それぞれの研究課題(以下、Sub-Research Question: S-RQ)として3つのS-RQについて以下のように結論づけられる。

2章では、第一のS-RQとしてモノづくりにおいて人とロボットの作業の中で安全なふれあいとは何か?そしてそのふれあいはどこまで許されるのか?との問いを設定した。学術的研究課題として、物理的な人への受容レベルとその判断が可能な感覚を決定し、身体的安全性を確保するために人の感じる感覚をアラート指標として記述できることを明らかにした。

第一のS-RQに対して人とロボット共存・協働のための安全基準構築について論じた。研究テーマとアプローチとして、①知覚特性を踏まえた物理的安全受容度の検証⇒安全に触れ合うための痛覚耐性の明確化、②人体への過渡的・準静的な痛覚耐性値の記述を明らかにした。学術成果は研究業績目録の業績(1)に対応する。

3章では、第二のS-RQとしてモノづくりにおいて、その許されたふれあいの範囲内で自律性を持って作業を助け合うことができるか?との問いを設定した。学術的研究課題として、その感覚を取り込んだロボットシステムが選定したアラート指標に従い、自律性を持って人との安全な接触検出と停止が可能であることを明らかにした。

第二のS-RQに対して安全基準を踏まえた共存・協働ロボットシステムについて論じた。研究テーマとアプローチとして、①人とロボットの接触問題の明確化～衝撃力と挟圧力緩和、②人とロボットの機械的インピーダンスマッチング問題として安全な接触と停止機能が実現できることを示した。学術成果は研究業績目録の業績(2)(3)に対応する。さらに、③人の耐性感覚を取り込んだ安全なロボットシステムの構築についても実現できることを示した。学術成果は研究業績目録の業績(4)(5)に対応する。

4章では第三のS-RQとしてモノづくりにおいて実現できたしくみや手段が実際の社会に定着でき、有効性を示すことができるのか?という問いを設定した。学術的研究課題として実際の生産ラインで安全性と助け合い(生産性)が両立できることを実証した。

第三のS-RQに対して安全な人との共存・協働ロボットシステムの実生産ラインへの適用を実施し、その有効性を示した。研究テーマとアプローチとして①社会定着のための安全検証と評価のしくみ構築と整備、②モノづくりにおける自動、共存・協働の特長を活かした

人とロボットの作業分担計画、③実ラインでの安全性・生産性両立の実証とその効果について明らかにした。学術成果は研究業績目録の業績(6)に対応する。

自動化の進化・深化として人とロボットが物理的に互いに意思を持って助け合うことの重要性を提言し、人とロボットは安全にふれあい、自律性を持った共存・協働作業ができるのか?といった研究課題を設定した。身体的安全性を確保するために人の痛覚耐性をアラートできる指標として統一的に記述し、その感覚を取り込んだロボットシステムの設計手法を提案し、人との安全な接触が可能であることを示し、実際の生産ラインでしくみの整備とあわせて安全性と生産性が両立できることを実証した。今後はより人とロボットがパートナーとして共に能力を高めあうための研究と開発を進めていきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの皆さまにご指導、ご支援及びご協力いただきましたことに心から感謝申し上げます。

博士論文執筆にあたっては、主査である相山康道先生には、企業人である小職を20回以上にもわたって親身にご指導いただきました。これには大変な労力とご負担があったことと察します。このプロセスで得られた経験はロボティクスの学び直しだけでなく、エンジニアとしての哲学を考え直す貴重な時間でした。また、研究及び開発技術に関して論理的な思考能力を醸成するご指導いただいたことは大きな財産となりました。ここに深くお礼を申し上げます。

副査の鈴木健嗣先生からは首尾一貫して研究の論理性について深くご指導いただきました。この経験は企業では得られないものでした。研究内容の深い部分から研究の進め方についても親身なアドバイスをいただきました。大変ありがとうございました。

副査の河本浩明先生からは最初のご指導の際に「あなたのリサーチクエスションは何ですか？」と問われて答えられなかったことが懐かしく感じます。研究の意義、問い、研究課題をこれからも大事に育てていきたいと思えます。あたたかいご指導ありがとうございました。

副査の中内靖先生とは予備審査の段階からご指導いただきました。中内先生からの深い投げかけに対して研究を洞察し、指導する力を学ばせていただきました。今後の研究・開発活動、人材育成に活かしたいと思えます。まことにありがとうございました。

副査の山田陽滋先生(現名古屋大学)とは豊田工業大学大学院時代から現在に至るまで27年間もの長い間ご指導いただきました。人とロボットの安全について国際規格の制定を牽引され学問的な体系化をすすめられました。小職がこのような研究に携われる機会をいただいたこと、いつもかわらず、あたたかくご指導いただきましたことに深謝いたします。

本研究については先行研究例がほぼない状態で、手探りでスタートしました。豊田工業大学大学院時代に研究の基盤づくりから応用までをご指導をいただきました今井孝二先生、土田縫夫先生、梅谷陽二先生に厚く御礼申し上げます。

本研究の痛覚耐性値の解明に関わる研究は、産官学の協力により実現されたものです。研究の機会及び援助を頂いた一般社団法人日本ロボット工業会に謝意を表します。

実際の痛覚耐性値の測定、分析にあたっては、現在の独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所との共同研究が無くては達成できないものでした。杉本旭氏、池田博康氏からは日本の安全をリードする気概と文化を学ばせていただきました。厚く御礼申し上げます。

日本ロボット工業会 WG3 メンバで株式会社デンソーウェーブの橋本秀一氏からは多くのロボット安全技術の標準化と真の安全確保に向けての議論をさせていただきました。深謝いたします。

安全性に関する妥当性評価にあたってはパナソニック株式会社プロダクト解析センターの渡邊竜司氏、岡本球夫氏、島岡優策氏のご支援、ご協力無しでは実現できませんでした。ここに深謝いたします。

本研究を遂行するにあたってはトヨタ自動車株式会社の関係者の皆様に感謝申し上げます。本研究の基礎研究の機会を与えていただき、エンジニアとしての基礎をご指導いただきました中村尚範氏へ深く感謝を申し上げます。また、産業用ロボット開発の業務に再度チャレンジする機会を与えていただいた大倉守彦氏、白井雅人氏に感謝いたします。

また、現在の株式会社デンソー広瀬製作所の実ラインへに当たっては、その機会とご支援をいただいた新美俊生氏に感謝申し上げます。実務遂行に当たっては、野々村潔氏、太田裕一氏のサポートがなくては実行できませんでした。ありがとうございました。

安全規格、リスクアセスメントについては星野晴康氏、安藤玄氏と多くの実用化に向けての有意義な議論を重ねることができました。感謝いたします。

痛覚耐性値の研究においてご支援いただいた株式会社トヨタプロダクションエンジニアリング三浦洋憲氏、実ライン導入を推進していただいた森建郎氏、松本一成氏、大野暁氏、小澤敦氏に感謝申し上げます。実ラインへの適用結果の整理に当たっては迫田美香氏にご協力を頂きました。まことにありがとうございました。

最後に温かく見守ってくれた家族に感謝したい。素人ながらも論文を読み、そんな時代がくるんだなと賛同してくれた両親、なんでも粘り強くやっていたら報われるものだとな常に励まし続けてくれた家内に感謝したい。

参考文献

- [1] 令和元年版高齢社会白書, 内閣府 平成30年度 高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況, https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2019/zenbun/01pdf_index.html
- [2] リンダ・グラットン, アンドリュー・スコット、ライフ・シフト, 東洋経済新聞社, 2016.
- [3] 産総研コンソーシアム～「人」が主役となるものづくり革新推進コンソーシアム, https://unit.aist.go.jp/icps/hcmi/document/introduction_202007.pdf
- [4] トヨタ自動車株式会社 Sustainability Data Book 2020年7月版, https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/report/sdb/sdb2007_jp.pdf
- [5] トヨタ自動車株式会社 EVの普及を目指して 2019.06.07, <https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/28416855.html>
- [6] トヨタ自動車株式会社 “トヨタ生産方式” 豊田章男の解釈 2020.08.26, <https://toyotatimes.jp/insidetoyota/091.html>
- [7] ISO 10218-1, Robots and robotic devices-Safety requirements for industrial robots - Part1: Robots, ISO(2011).
- [8] ISO 10218-2, Robots and robotic devices-Safety requirements for industrial robots - Part2: Robot systems and integration, ISO(2011).
- [9] K.Suita, M.Shirai, and J.Ikushima, Integrated Robot System Operation for Achieving High Productivity, IBEC2003, 2003.
- [10] 例えば, IN FOCUS 同僚はロボット 進む協働, 日本経済新聞特集, 2019.5.4.
- [11] M.Rahimi, W.Karwowski, Human Perception of Robot Safe Speed and Idle Time, Behav. Inf. Technol., 9-5, 381, 1990.
- [12] 手嶋教之, 福祉ロボットにおける心理面からみた安全性(第1報)-ロボット速度・顔からの距離と恐怖心, 第10回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1107-1108, 1992.
- [13] 大塚英樹, 池浦良淳, 猪岡光: ロボットの動きが人間の心理に及ぼす影響, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1209, 1993.
- [14] 山本智規・柴田論・神代充・清水顯, SD法を用いたロボットの人間回避運動の心理的分析, 日本機械学会論文集C編, 66(650), pp.3366-3372, 2000.
- [15] 山田 陽滋, 吹田 和嗣, 池田 博康, 杉本 旭, 三浦 洋憲, 中村 尚範, ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明, 日本機械学会論文集C編, 63(612), pp.2814-2819, 1997.
- [16] 齋藤 剛, 池田博康, 人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚耐性限界の測定, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-NO.33, 2005.
- [17] Research project No. FP-0317: Collaborative robots - Investigation of pain sensibility at the Man-Machine-Interface. Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine at the Johannes, Gutenberg University of Mainz, Germany. Final report, 2014.
- [18] ISO/TS 15066, Robots and robotic devices Collaborative robots, ISO(2016)

- [19] 山田 陽滋, 藤川 達夫, 鍋嶋 厚太, ISO/TC 299/WG 2(サービスロボットの安全)の現状と今後, 日本ロボット学会誌, 38 巻 5 号 pp.423-427, 2020.
- [20] 清水雄一郎, JIS Y1001 サービスロボットを活用したロボットサービスの安全マネジメントシステムの規格制定の背景及び要求事項について, ロボット, No.254, pp.17-21, 2020.
- [21] 例えば, 堂前幸康, 多田充徳, 谷川民生, サイバーフィジカルシステムと人・機械協調, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.8, pp.683-686, 2019.
- [22] 例えば, 村山 英之, 藤原 弘俊, 人と協働する自動車組立ロボットの安全技術, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.9, pp.783-785, 2011.
- [23] 例えば, 衣川 潤, 若林 勇太, 金澤 亮, 小菅 一弘, 自動車組立工程のための協働ロボット PaDY, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.10, pp.928-933, 2019.
- [24] Demystifying Collaborative Industrial Robots,
https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf, 2018.
- [25] D.Kulić, E.Croft, Pre-collision safety strategies for human-robot interaction, Autonomous Robots, vol.22, no.2, pp.149-164, 2007.
- [26] 金唯眞, 山田陽滋, 岡本正吾, 人間-ロボット協働作業系の安全, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.10, pp.923-927, 2019.
- [27] 池田博康, 協働ロボットのリスクアセスメントと残留リスク低減の考え方, ロボット, No.237, 2017.
- [28] IEC/TS 62998-1 Ed. 1.0, Safety of machinery - Safety - related sensors used for the protection of persons, 2019.
- [29] 向殿正男, Safety2.0 とは何か? 隔離の安全から協調安全へ, 中災防ブックレット, 2019.
- [30] 一般社団法人 セーフティグローバル推進機構, IEC が描く協調安全の世界と今後の展望, IEC 白書発行記念シンポジウム,
<https://institute-gsafty.com/international-safety-symposium/2020-4/>, 2020.
- [31] 吹田 和嗣, 自動車製造業における協働化の取り組みと今後の課題, ロボット, No.252, pp.28-32, 2020.
- [32] Manipulating Industrial Robots, ISO 10218, 1992..
- [33] M.C.Bonny, Y.F.Yong, Robot Safety, IFS Ltd. and Springer-Verlag, 1985.
- [34] B.S.Dhillon, O.C.Anude, Rob01 Safety and Reliability: A Review Microelectron. Reliab., 33-3, 413, Pergamon Press, 1993.
- [35] 白水宏典, 新高齢化社会対話(自動車組立工場での), 日本機械学会誌, 96-898, pp.838-842, 1993.
- [36] 吹田和嗣, 山田陽滋, 土田縫夫, 今井孝二, 柔らかい被覆を持つロボットによる人間との接触検出に関する研究, ロボティクス メカトロニクス講演会 '94論文集, pp.897-902, 1994.
- [37] J.F.Engelberger, Robotics in Service, (1989), Kogan Page Ltd.
- [38] 人間と共存するロボットの新技术, 計測と制御, 34-4, (1995).
- [39] 中坊嘉宏, 李秀雄, 山田陽滋, 人と安全に共存するロボットのための視覚センサと力覚センサシステム, 日本信頼性学会誌 信頼性, 29-5, pp.301-309, 2007.
- [40] 西村秀和, 自動車の安全を考える, 安全工学, 54-3, pp.153-157, 2015.

- [41] 杉本旭, 蓬原弘一, 安全制御系における安全情報のエネルギー伝達, 日本機械学会論文集 C 編, 56-530, pp.2658-2665, 1990.
- [42] 松野正徳, 衝突に対する人間の生存限界, 日本機械学会誌, 82-726, pp.482-489, 1979.
- [43] 石山慎一, 人体の衝突傷害耐性研究とダミー開発, バイオメカニズム, 14, pp.1-12, 1998.
- [44] 杉本旭, ロボットと安全, , 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 1, pp.56-59, 1985.
- [45] 濱島京子, 梅崎重夫, 清水尚憲, 第三次産業における機械設備での死亡労働災害分析—人間機械協調技術の視点からの労働災害防止対策の提案—, 労働安全衛生研究, Vol.2, pp.121-126, 2009.
- [46] IASP Subcommittee on Taxonomy, Classification of Chronic Pain. Description of Chronic Pain Syndromes and Definition of Pain Terms. Pain Suppl, 3, 1986.
- [47] 浅田稔, なじみ社会構築に向けて:人工痛覚がもたらす共感, 道徳, そして倫理, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.4, pp. 287-292, 2019.
- [48] 加藤一郎, 人間ロボット論, 日本ロボット学会誌, Vol. 10 No. 1, pp76-79. 1992.
- [49] W.R.Kennedy, G.Wendelschafer-Crabb, The innervation of Human Epidermis, Journal of the Neurological Sciences, Vol.115, Issue 2, pp.184-190, 1993.
- [50] 赤松幹之, 痛みと評価, バイオメカニズム学会誌, 14, 3, pp.151-159, 1990.
- [51] L.C.Greene, J.D. Hardy, Adaptation of thermal pain in the skin, J. Applied Physiology, Vol.17, Issue 4, pp. 693-696, 1962.
- [52] R.F.Schmidt, 岩村吉晃[ほか]訳, 感覚生理学,金芳堂, 1982.
- [53] 三浦洋憲, 吹田和嗣, 山田陽滋, 池田博康, 杉本旭, 人・ロボット共存のための人間工学実験による人体耐性値の解明, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 639,1994.
- [54] 入江隆, 岡久雄, 山本辰馬, 生体機械インピーダンスの測定値の意味と硬さの指標, 電子情報通信学会論文誌D-II, J75-D-II-5, pp.947-955, 1992.
- [55] L.M.Patrick, Human Tolerance to Impact-Basis for Safety Design, SAE Trans., SAE Paper, 650171, 785, 1964
- [56] 畠山一平, 生物サイバネティクス II, 319, 朝倉書店, 1989.
- [57] 赤松幹之, 針の押し込み量をパラメータとした痛覚閾値測定, 医用電子と生体工学, 21-6, pp.465-471, 1983.
- [58] 中川徹, 小柳義夫, 最小二乗法による実験データの解析, 東京大学出版会, 1987.
- [59] Mewes, D. and F. Mauser: "Safeguarding Crushing Points by Limitation of Forces." International, Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 9. (2), pp.177-191, 2003.
- [60] B.Povse, D.Koritnik, R.Kamnik, T.bajd and M.Munih, Industrial robot and human operator collision, IEEE Int.Conf. on System, man and Cybernetics, pp.2663-2668, 2010.
- [61] G.T.Desmoulin and G.S.Anderson, Method to investigate contusion mechanics in living humans, J. of forensic biomechanics, vol.2, pp1-10, 2011.
- [62] S.Haddain, A.Khoury, T.Rokahr, S.Parusel, R.Burgkart and A.Albu-Schaffer, On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control, The Internatinal J. of Robotics Reserch, vol.31, no.13, pp.1578-1602, 2012.

- [63] 一般社団法人 日本機械工業連合会, 平成30年度ISO/TC199部会 成果報告書, http://www.jmf.or.jp/content/files/houkokusho/gannendo/30TC199_h.pdf
- [64] R.Sugiura, T.Fujikawa, R.Nishikata, and T.Nishimoto, Soft Tissue Bruise Injury by Blunt Impact in Human-Robot interaction - Difference of Tolerance between Chest and Extermities, 19th Int. Conference on Control, Automation and Systems, pp.792-797, 2019.
- [65] 中澤弘, 人中心生産システムを支援するコリーグロボット -産業用ロボットの新しい概念, 日本ロボット学会誌, 12(8), pp.1111-1114, 1994.
- [66] H. Kazerooni, M. Bobgan, Human Induced Instability in Powered controllers, Proc. IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, pp.755-760, 1992.
- [67] 杉本旭, 産業用ロボットと人間との共同作業, 第 21 回安全工学シンポジウム講演予稿集, pp.134-137, 1991.
- [68] J. H. Graham, D. L. Millard, Toward Development of Inherently Safe Robots, Proc. 17th int. Symp. on Industrial Robots, 9-11-9-17, 1991.
- [69] V.J.Lumelsky, E.Cheung, Real-Time Collision Avoidance in Teleoperated Whole-Sensitive Robot Arm Manipulators, IEEE, Trans. On Syst. Man. Cybern., vol.23-1, pp.194-203, 1993.
- [70] 山田陽滋, 土田縫夫, 上田實, 円筒形アームのための障害物検出用近接覚一触覚センサ, 日本ロボット学会誌, 6-4, pp.292-299, 1988.
- [71] 山田陽滋, 杉本旭, 人間の痛覚耐性値の評価, 日本ロボット学会誌, 13-5, pp.639-642, 1995.
- [72] 山田陽滋, 吹田和嗣, 今井孝二, 池田博康, 杉本旭, 痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボットシステム, 日本機械学会論文集C編 63(614), pp.3552-3557, 1997.
- [73] Y.Yamada, K.Suita, K.Imai, H.Ikeda, and N.Sugimoto, A failure-to-safety robot system for human-robot coexistence, Robotics and Autonomous Systems, Vol18, no.1-2, pp.283-291, 1996.
- [74] 星野 晴康, 協働ロボットシステムのリスクアセスメントとリスク低減の方策 (特集 協働ロボットシステムのリスクアセスメントと安全確保) 機械設計 Machine design 61(13), 16-22, 日刊工業新聞社, 2017.
- [75] 池浦 良淳, 大塚 英樹, 猪岡 光, 皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察, 人間工学, 31-5, pp.355-358, 1995.
- [76] T.Murakami, F.Yu, and K.Ohnishi, Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 40-2, pp.259-265, 1993.
- [77] 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌, 横倉 勇希, 産業用ロボットのジャーク信号と動力学に基づく動的閾値を用いる力センサレス接触検知電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌 133(3), 368-377, 2013.
- [78] 中村 尚範, 吹田 和嗣, 板谷 敏郎, ロボットのオフラインプログラミングシステムのための簡便なロボット機械誤差補正法~機械誤差の統一モデル化と定式化 (第 1 報), 精密工学会誌, 60 巻 10 号, p. 1500-1504, 1994.

- [79] 中村 尚範, 吹田 和嗣, 板谷 敏郎, ロボットのオフラインプログラミングシステムのための簡便なロボット機械誤差補正法(第2報), 機械誤差の推定方程式の定式化と解法, 精密工学会誌, 62巻1号, p. 135-139, 1996.
- [80] D.E.Whitney, C.A.Loizinski, J.M.Rourke, Industrial robot forward calibration method and results, J. Dynamic Systems Meas. Control, Vol.108, pp1-8, 1986.
- [81] Y.S.Luh, M.Walker, R.Paul, Joint Torque Control by a direct feedback for industrial robots, IEEE. Trns. Automatic Contrl, AC-25, pp.468-474, 1983.
- [82] C.H.An, C.G.Atkeson, J.M.Hollerbach, Model-based Control of a Robot Manipulator, MIT press, Cambridge, Massachusetts, 1988.
- [83] D.A.Hasessig Jr.,B.Friedlamd, On the Modeling and Simulation of Friction, ASME. Trns. Dyn. Sys. Mes. Cont., Vol113, pp354-362, 1991.
- [84] H.maeda, K.Osuka, and A.Kangawa, A New Identification Method for Serial Manipulator Arms, Proc. of IFAC 9th World Conf., Vo.2, pp74-79, 1984.
- [85] C.G.Atkerson, J.M.Hollerbach, Estimation of Inertia parameters of Manipulator Loads and Links, Proc. of 3rd ISIR, pp32-39, 1985.
- [86] D.Siegel, I.Garabieta, J.M.Hollerbach, An Integrated Tactile and Thermal Sensor, in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp1286-1291, 1986.
- [87] M.T.Mason, J.K.Sailisbury, Kinematic and Force Analysis of articulated hands: Robot Hands and the Mechatronics of Manipulation, Cambridge, Massachusetts, MIT press, pp2-167, 1983.
- [88] 志村 康治, 堀 洋一, ロボットマニピュレータにおける力制御のロバスト化と衝突過程の制御, 日本ロボット学会誌, 11巻2号 p. 235-245, 1993.
- [89] R.W.Brockett, Robotic hands with rheological surfaces, in Proc. IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, pp.942-947, 1985.
- [90] K.B.Shimoga, A.A.Goldenberg, Soft Materials for Robotic Fingers, in Proc. IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, pp.1300-1305, 1992.
- [91] Y.Yamada, Y.Hirasawa, S.Huang, Y.Umetani, and K.Suita, Human-robot contact in the safeguarding space, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol2, N0.4, pp230-236, 1997.
- [92] K.Suita, Y.Yamada, N.Tuchida, K.Imai, H.lkeda, and N.Sugimoto, Failure-to-Safety 'Kyozon' System with Simple Contact Detection and Stop Capabilities for Safe Human-Autonomous Robot Coexistence, Proc. IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, pp.3089-3096, 1995.
- [93] 加藤, 逢原, フェイルセーフ・ウィンドウコンパレータ/ANDゲートとその応用, 日本信号技法, 15-2, 9-1, 1991.
- [94] 基安安発 1224 第 1 号, 産業用ロボットに係る労働安全衛生規則第 150 条の 4 の施行通達の一部改正に当たっての留意事項について, 厚生労働省労働基準局安全衛生部(平成 25 年 12 月 24 日)
- [95] 基安安発 1224 第 2 号, 産業用ロボットに係る労働安全衛生規則第 150 条の 4 の施行通達の一部改正について, 厚生労働省労働基準局安全衛生部(平成 25 年 12 月 24 日)

- [96] 土肥正男, 岡田和也, 前田育男, 藤谷繁年, 藤田俊弘, 人—ロボットの共存環境における生産性と安全性の向上を高次元で実現する新しい協調安全の考え方と協調安全水準(CSL)の概念の提案, ロボット No.237, 2017.
- [97] 星野晴康, トヨタ自動車語る、安全への経営層の積極関与の成果と、協働ロボット活用のための協調安全『Safety2.0』への期待, 第三回 国際安全シンポジウム, 一般社団法人セーフティグローバル推進機構(IGSAP), 株式会社日経 BP 総合研究所, 2018.
- [98] 池田博康, リスクアセスメントシート解説 -リスクアセスメントに基づく安全設計の基礎-, http://robotcare.jp/data/outcomes/SG-3-2_risk_help.pdf
- [99] M.Webster, D.Western, D.Araiza-Illan, C.Dixon, K.Eder, M.Fisher, A.G.Pipe, A corroborative approach to verification and validation of human-robot teams, Journal of Robotics Vol 39, Issue 1, 2020.
- [100] Y.Yamada, Y.Akiyama, Physical Assistant Robot Safety, Systems and Applications, Wearable Robotics, Elsevier, pp.275-299, 2020.
- [101] GTE Industrieelektronik GmbH, Force and Pressure Measurement System for Collaborative Robots products list;
https://www.gte.de/material/325-2811-001_EN11_Flyer_CoboSafe_CBSF-75-Basic.pdf
https://www.gte.de/material/325-2811-004_EN15_Flyer_CoboSafe_CBSF-75-Gripper.pdf
https://www.gte.de/material/325-2811-004_EN26_Flyer_CoboSafe.pdf
- [102] ピルツジャパン株式会社, 人とロボットの協働のための衝突測定セット PRMS
<https://www.pilz.com/ja-JP/eshop/00108002497137/PRMS>
- [103] パナソニック株式会社「プロダクト解析センター, 協働ロボット/現場適応ロボット向け衝突安全評価サービス,
https://www.panasonic.com/jp/corporate/pac/safety/human_safety/human_safety.html
- [104] 例えば, 中坊嘉宏, 黒瀬竜一, 角保志, 尾暮拓也, 藤原清司, 森大介, 人共存作業ロボットのための柔軟外装センサの安全規格適合, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2018.
- [105] 佐藤知正, SIer 業界に期待すること, ロボット, No.250, 2019.
- [106] 例えば, 伊木夢奈, 山田陽滋, 秋山靖博, 岡本正吾, 丹羽邦幸, 劉建, 手部ダミー作製のためのロボットと人間の接触実験の評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2019.
- [107] トヨタ自動車, バーチャル人体モデル「THUMS」を改良 -自動運転車両を含む将来のクルマの利用シーンに対応-
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/26450557.html>
- [108] 森田寿郎, 鈴木雄一郎, 川崎毅彦, 菅野重樹, 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御日本ロボット学会誌16 巻 1 号, 1998.
- [109] 協働ロボットアーム - Nicebot, <https://www.nicebot.jp/#/>
- [110] 特集:ソフトロボティクス, 日本ロボット学会誌, 37-1, 2019.
- [111] 特集:ソフトロボット学, 日本機械学会誌, 122-1205, 2019.
- [112] 特集:ソフトロボット機構の発祥と展開, 計測と制御, 58-10, 2019.
- [113] 特集:アクティブマテリアルのロボティクス・メカトロニクス応用に向けて, 計測と制御, 59-11, 2020.

- [114] NEDO, 技術研究組合 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構, 産業用ロボットのさらなる普及に向けて基礎技術研究基盤を強化, 2020. <https://robocip.or.jp/>
- [115] S.Szabo, W.Shackleford, R.Norcross, J.Marvel, A testbed for evaluation of speed and separation monitoring in a human robot collaborative environment, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2012.
- [116] J.A.Marvel, Performance Metrics of Speed and Separation Monitoring in Shared Workspaces, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol.10, No.2, pp.405-414, 2013.
- [117] H.Petersen, R.Behrens, J.Saenz, et al., Reliable planning of human-robot-collaboration featuring speed and separation monitoring, Automated Systems, pp.55-61, 2018.
- [118] C.Byner, B.Matthias, H.Ding, Dynamic speed and separation monitoring for collaborative robot applications concepts and performance, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, vol.58, pp239-252, 2019.
- [119] N.M. Ceriani, G.B. Avanzini, A.M. Zanchettin, Optimal placement of spots in distributed proximity sensors for safe human-robot interaction, International Conference on Robotics and Automation, pp.5858-5863, 2013.
- [120] E.Kim, Y.Yamada, S.Okamoto, M.Sennin, H.Kito, Considerations of potential runaway motion and physical interaction for speed and separation monitoring, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.67, Elsevier, 2021.
- [121] G.B.Avanzini, N.M.Ceriani, A.M.Zanchettin, P.Rocco, L.Bascetta, Safety Control of Industrial Robots Based on a Distributed Distance Sensor, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.22, No.6, pp.2127-2140, 2014.
- [122] J.T.C.Tan, F.Duan, Y.Zhang, K.Watanabe, R.Kato, T.Arai, Human-robot collaboration in cellular manufacturing, Design and development, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.29-34, 2009.
- [123] Pilz, Safe camera Systems-Safe zone monitoring with Pilz camera systems
<https://www.pilz.com/en-INT/products/sensor-technology/safe-camera-systems>
- [124] M.Safeea, P.Neto, Minimum distance calculation using laser scanner and IMUs for safe human-robot interaction, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.58, pp.33-42, 2019.
- [125] 内閣府, 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現, ムーンショット型研究開発制度, <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub3.html>

研究業績目録

査読付き雑誌論文

- (1)山田 陽滋, 吹田 和嗣, 池田 博康, 杉本 旭, 三浦 洋憲, 中村 尚範,
ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明,
日本機械学会論文集C編 63(612), pp.2814-2819, 1997.
- (2)山田 陽滋, 吹田 和嗣, 今井 孝二, 池田 博康, 杉本 旭,
痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボットシステム,
日本機械学会論文集C編 63(614), pp.3552-3557, 1997.
- (3) Yoji Yamada, Kazutsugu Suita, Koji Imai, Hiroyasu Ikeda, and Noboru Sugimoto, A
failure-to-safety robot system for human-robot coexistence, Robotics and Autonomous
Systems, Vol18, no.1-2, pp.283-291, 1996.
- (4)Yoji Yamada Yasuhiro Hirasawa Shengyang Huang, Yoji Umetani, and Kazutsugu Suita
Human-robot contact in the safeguarding space, IEEE/ASME Transactions on
Mechatronics, Vol2, N0.4, pp230-236, 1997.

査読付き国際会議論文

- (5) Kazutsugu. Suita, Yoji Yamada , Nuiio. Tsuchida, Koji. Imai, Hiroyasu. Ikeda, and N.
Sugimoto, A failure-to-safety "Kyozon" system with simple contact detection and stop
capabilities for safe human-autonomous robot coexistence, IEEE International Conference
on Robotics and Automation 0-7803-1965-6/95, pp3089-3096, 1995.

報告

- (6)吹田 和嗣, 自動車製造における協働化の取り組みと今後の課題, ロボット, No.252,
pp.28-32, 2020.

特許

- (7)吹田 和嗣, 今井 孝二, 土田 縫夫, 山田 陽滋, ロボット, 出願番号 H06146685.
(8)吹田 和嗣, 今井 孝二, 土田 縫夫, 山田 陽滋, 等価回路参照型制御装置と制御方
法, 出願番号 H07049945.

※査読付き論文において全ての学術業績の主たる筆者は吹田 和嗣となります。
また共著者の学位業績には使用されておられません。

用語・記号の定義

SUBSCRIPTS

el: semi-ellipsoid
max: maximum
min: minimum
x: x-coordinate; state x
y: y-coordinate; state y
z: z-coordinate; state z

SUPERSCRIPTS

T: transpose
 α : Stevens power function parameter
-1: inverse
^: estimation
·: derivative of time

NOTATION

$\mathbf{a} \sim \mathbf{l}$: measurement points of human subject
 A_c, B_c, C_c : contact positions of robot arm
 \mathbf{b} : vector of robot dynamics parameters
 $b_1 \sim b_9$: robot dynamics parameters
 D : energy dissipation function
 D_{kr} : coefficient tensor of kinetic friction

D_1 : coefficient of kinetic friction of link 1
 D_2 : coefficient of kinetic friction of link 2
 F_c : tolerable contact force
 $F(t)$: interaction force
 $F_e(t)$: interaction force of elastic factor
 $F_v(t)$: interaction force of viscous factor
 F_{ave} : mean value of interaction force
 F_{s1} : resolution force of link 1
 F_{s2} : resolution force of link 2
 G_m : elastic modulus
 h : constants of robot dynamic formulations
 $\mathbf{h}_1(\mathbf{q},\mathbf{q})$: friction factor vector
 $h_{11}(\mathbf{q},\mathbf{q}), h_{12}(\mathbf{q},\mathbf{q})$: elements of friction factor vector $\mathbf{h}_1(\mathbf{q},\mathbf{q})$
 $\mathbf{h}_{nl}(\mathbf{q},\mathbf{q})$: factor of centrifugal and Coriolis force
 $h_{nl1}(\mathbf{q},\mathbf{q}), h_{nl2}(\mathbf{q},\mathbf{q})$: elements of centrifugal and Coriolis force $\mathbf{h}_{nl}(\mathbf{q},\mathbf{q})$
 \mathbf{I}_c : torque current vector
 I_{c1} : first element of torque current vector \mathbf{I}_c
 I_{c2} : second element of torque current vector \mathbf{I}_c
 $\mathbf{I}(\mathbf{q})$: inertia matrix
 $I_{11} \sim I_{22}$: elements of inertia tensor $\mathbf{I}(\mathbf{q})$
 J_1 : inertia of link 1
 J_2 : inertia of link 2
 \mathbf{K} : friction constants tensor
 \mathbf{K}_c : torque constants tensor
 K_{c1} : first element of torque constants tensor \mathbf{K}_c
 K_{c2} : second element of torque constants tensor \mathbf{K}_c
 K_i : gain parameter in Stevens power function
 \mathbf{K}_p : position gain vector of robot control amplifier
 K_{p1}, K_{p2} : position gain element of \mathbf{K}_p
 K_{s1} : gain parameter of stimulus receptor 1
 K_{s2} : gain parameter of stimulus receptor 2
 \mathbf{K}_v : speed gain vector of robot control amplifier

K_{v1}, K_{v2} : speed gain element of K_v
L: Lagrangian function
 l_{\min} : minimum length of robot arm for contact sensitivity
 l_1 : length of link 1
 l_2 : length of link 2
 M_e : effective mass value for collision simulation
 $M_1 \sim M_2$: viscoelastic material (commercially available)
m: row number of tensor or matrix
 m_1 : mass of link1
 m_2 : mass of link2
 m_t : mass of tool
n: column number of tensor or matrix
PI(t): pain intensity
q: generalized coordinates
 q_1 : revolution angle of link 1
 q_2 : revolution angle of link 2
 q_d : desired trajectories
 $R^{n \times m}$: sub space of n multiplied by m
R: robot dynamics model
 r_1 : length of link 1 between center of revolution and center of gravity
 r_2 : length of link 2 between center of revolution and center of gravity
 S_{\min} : minimum value of contact area
S(t): contact area function of time t
S(z): contact area function of z -coordinate
 $T_g(q)$: gravity factor
 T_s : emergency stop time of robot manipulator
 T_{sf} : coefficient vector of static friction
 t_1 : time of contact recognition
 t_2 : time of stop
 t_{el} : time of elastic limit
 $t(q)$: total kinetic energy
 $u(q)$: potential energy

V_c : velocity limit of robot manipulator
 V_{\max} : maximum value of deformation speed of human body by a contact
 $V(t)$: deformation speed of human body by a contact
 $V_1(t)$: contact volume function of time
 W : state of control output
 X_{el} : length of semi-ellipsoid for x-direction
 X_i : stimulus
 Y : sensation intensity
 Y_{el} : length of semi-ellipsoid for y-direction
 Z_{el} : length of semi-ellipsoid for z-direction
 α_c : acceleration limit of robot manipulator
 α_m : mean value of impact acceleration
 δ_{\max} : maximum value of deformation of human body by a contact
 $\delta(t)$: deformation of human body by a contact
 Δt : impact time
 ϕ : diameter of contact probe
 η_m : coefficient of viscosity
 τ : joint torque vector derived from motor driver
 τ_{ext} : external torque vector
 τ_{fb} : joint feed back torque vector
 τ_{ff} : joint feed forward torque vector
 τ_r : joint torque vector
 τ_1, τ_2 : joint torque of link 1, link 2
 Ω : observational tensor for least squares method
 $\Omega_{11} \sim \Omega_{29}$: element of observational tensor for least squares method Ω

ABBREVIATIONS

A/D: analog/digital

D/A: digital/analog

EMG: emergency

EV: electric vehicle

FCV: fuel cell vehicle

FSAG: failure-to-safety AND gate

FSWC: failure-to-safety window comparator

HV: hybrid vehicle

M-RQ: main research question

PFL: power force limiting

PIC: pain intensity curve

PHV: plug-in hybrid vehicle

SCARA: selective compliance assembly robot arm

S.D.: standard deviation

S-RQ: sub research question

SSM: speed and separation monitoring

VEC: viscoelastic covering

W/H: wire harness