**様式 C-19**

# 科学研究費補助金研究成果報告書

平成２３年　５月３１日現在

機関番号：１３８０１
研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2008～2010
課題番号：２０５６０２３６
研究課題名（和文）　スキル拡張型遠隔作業ロボットを用いた人間機械協調高効率セル生産システムの構築
研究課題名（英文）　Human-machine Cooperative cellular manufacturing system based on Skill-extended Robot Teleoperation
研究代表者
伊藤　友孝（ITO TOMOTAKA）
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号：００２８３３４１

研究成果の概要（和文）：本研究は，近年，生産現場で採用が広がっているセル生産方式において，ロボットに協調的に人の作業に介入させることで，微細作業などの高度な作業の実現や作業者の負担の軽減が期待できる人間機械協調型の生産システムを構築することを目指したものである．本研究期間では，直感的な定式化が難しい熟練作業者の持つ作業のコツ（スキル）を実験的に抽出し，それをロボットに持たせる方法について研究を行い，半田付け作業・機械部品の組み付け作業を題材に実際に作業支援システムを構築して効果を実証した．研究成果は，2本に分けて論文投稿を準備中である．

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is realizing a human-robot cooperative cellular manufacturing system in which robots assist human workers cooperatively to execute high-level tasks and to reduce the burdens. In this research, we studied how to extract the human skill from the task data of veteran workers and how to realize it by robot control. Soldering task and parts-mating task were considered as example tasks and the cooperative task assist system was designed. The experimental results showed the validity of the proposed system.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合　計 |
|---|---|---|---|
| ２００８年度 | 2,700,000 | 810,000 | 3,510,000 |
| ２００９年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| ２０１０年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総　計 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究代表者の専門分野：ロボット工学，制御工学
科研費の分科・細目：「機械工学」・「知能機械学・機械システム」
キーワード：ロボット，作業スキル，遠隔操作，セル生産，人間機械協調

１．研究開始当初の背景

現在の完全自動化による生産（オートメーション）は，工程分割と個別専用治具設計の賜物であり，生産ラインの立ち上げには多大な時間とコストが必要となるため，同一製品を大量生産する場合でないと労力に見合ったものにならない．また，例えば半導体センサーチップ等の微細部品の組み付けや複雑形状をした電子部品の半田付けなど，完全な自動化が難しい作業も多く，苦労して自動化しても歩留まりが悪いなどの大きな問題がある．

一方で，人間の持つ能力を生かし，多種少量生産に臨機応変に対応することを目的に，

電機機器メーカーを中心にセル生産方式の導入が進んでおり大きな効果をあげている．しかし，完全な手作業では作業者の負担が大きく，熟練度によって作業の成否や効率が左右されるため，作業者を育成するための訓練に大きな課題を抱えている．また，素手で行う作業には能力上の限界もあることも問題である．

そこで本研究では，人とロボット（機械）との協調によるセル生産の実現を将来目標として設定した．人の持つ判断能力などの長所と，ロボット（機械）の持つ精密動作の長所を融合することで，効果的な協調生産システムが実現できると考える．

２．研究の目的

人がロボット（機械）の助けを借りながら協調的に作業を行える「人間機械協調型セル生産システム」の実現を将来目標とし，本研究期間では，そのための効果的な手法を検討することを目的とした．この用途でのロボットの応用の可能性を広げるためには，通常考えうる精密動作支援（運動の縮小，力一定制御など）や重力補償支援，パワーアシストなどに加えて，熟練作業者が有するような柔軟な判断能力を持ち，“作業に必要な器用さ”を知的に支援する機能が必要となる．

そこで本研究では，直感的な定式化が難しい“熟練作業者の持つ作業のコツ（スキル)”を実験的に抽出し，それをロボットに持たせて効果的に作業を支援するための手法について検討を行うこととした．

３．研究の方法

今回の研究では，センサ部品の組み立て等，微細作業時の力や運動のスケール変換支援を行うことも考慮して，遠隔操作型ロボットを介して人とロボットが協調作業を行う方式を選択した．このシステムでは，作業者は作業状況が映し出されたモニタ画面を見ながらロボットを遠隔操縦して作業を遂行する．ロボットは作業者の動作を“物理的（力覚的)”に支援する他，モニタ画面上に支援情報を提示して“視覚的”にも作業支援を行う．

今回は，電子部品の半田付け作業とセンサ部品の組み立て作業の二つを題材とし，以下の検討を行うこととした．

(1) 協調作業及び熟練者のスキル抽出のための遠隔作業ロボットシステムの構築

本研究の将来目標である人間機械協調型遠隔作業ロボットの機能を検証するための実験システムを構築する．システムは，作業の遂行および物理的（力覚的）作業支援を行うための遠隔操作型ロボットと，作業状況や支援情報を作業者に提示して支援するための映像提示装置から成る．それと同時に，図１のように，熟練者が遠隔操作型ロボットを用いて実施した作業データを解析して，熟練者の持つ作業スキルを抽出するための実験システムでもある．

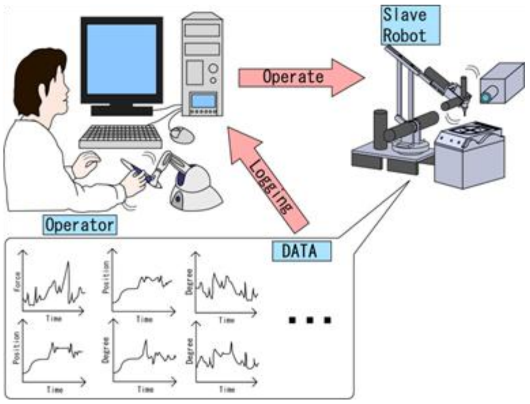



図１　協調作業・スキル抽出実験システム

(2) 熟練者の半田付けスキルの抽出と非熟練者のための作業支援システムの構築

電子部品の半田付け作業は，各動作は比較的単純だが，鏝（こて）の押し当て方や半田の投入タイミング，鏝先温度などの要因が後々まで影響し合い，最終的な仕上がりに繋がるため，条件の因果関係が明確でない．そのような作業でも，熟練者は経験から得た何らかのコツをもって非常に上手く作業を行っており，そこには作業に適した戦略があるはずで，これを抽出する方法が見つかれば他の作業への応用も含めて様々な発展が期待できる．生産現場では熟練者による半田付け工程がまだ多く残されており，大きな負担となっているため，半田付け支援システムとしての意義も大きい．

そこで本課題では，半田付け作業を例にとり，遠隔操作ロボットを用いて実施した作業のデータから，多変量解析の考えに基づいて熟練者の作業を統計的に分析し，作業データに隠れた因果関係から熟練者の持つ作業戦略を明らかにする方法を検討した．そして，実際に熟練者の半田付け作業戦略を作業チャートとして抽出し，それを基に非熟練者の作業支援を行って，抽出した作業戦略と支援システムの有効性を確認した．

(3) センサ部品の組み立てスキルの抽出と作業支援システムの構築

機械部品の組み立ては，工程分割や作業の各局面での達成目標は比較的明確であるが，精密な部品や複雑な形状をした部品の組み立て動作は複雑で，熟練作業者は，経験による習熟に基づいて対象作業に合わせた適切かつ器用な操りを見せる．様々な作業に対して熟練者の動作戦略を抽出することができれば，それをデータベース化して作業ロボッ

トに搭載し，支援機能として適宜選択しながら作業を効果的に行える人間機械協調型の生産システムや，非熟練者の訓練システムとして応用できると考える．

そこで本課題では，もう一つの題材として，クリアランスの小さい精密センサ部品の組み立て作業（図２）を選んだ．熟練者の組み立て作業のデータから動作特徴を抽出し，それをロボットに持たせることで，有効に作業を行えるかどうか，また，非熟練者の作業支援を効果的に行えるかどうかを検証した．

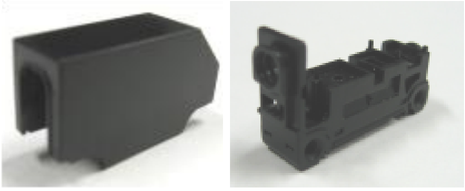


図２　センサ部品（センサケース）

## ４．研究成果

### (1) 協調作業及び熟練者のスキル抽出のための遠隔作業ロボットシステムの構築

熟練者の作業スキルの抽出および協調作業の評価実験に使用するための遠隔作業実験システムを構築した（図３）．システムは操縦側ロボットと作業側ロボットからなる 6 自由度マスタースレーブ方式となっており，各ロボットの手先に取り付けられた力覚センサの情報を用いてインピーダンス制御を行っている．

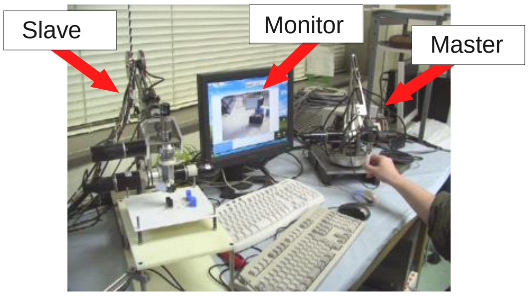



図３　構築した作業実験システム

また，作業状況を映像で取得して作業者に提示するため，作業ロボット側にはカメラをステレオで設置してあり，映像は，中央の裸眼立体視ディスプレイに提示される．人間の視覚特性を調べる実験にも使えるように，映像を画像処理して提示する機能や，立体視と単眼視を切り替えられる機能も搭載した．また，作業時に支援情報を画面上に直感的に提示きるように，立体視版の強化現実機能（立体映像上に同じ立体感で CG などの不可情報を重ねて提示する機能）も実現した（図４）．

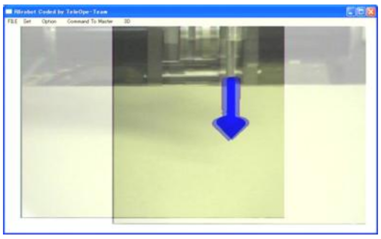
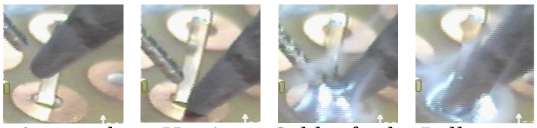


図４　強化現実的情報提示の例（専用ディスプレイで見ると立体的に見える）

### (2) 熟練者の半田付けスキルの抽出と非熟練者のための作業支援システムの構築

①半田付けスキル抽出実験システム

前述のロボットシステムに半田付け実験のための装置を付加してスキル抽出実験を行った．スレーブロボットの手先に半田鏝を装着し，作業者が操縦側ロボットのグリップ部を半田鏝に見立てて動かすと作業ロボットが同様の動作を行い，直接半田鏝を動かしている感覚になるように制御した．熱電対内臓の半田鏝と温度調整器を用いることで，リアルタイムでの鏝先温度の計測や出力変更が行えるようにした．また，半田送り機を改造して，PC のキーボードのボタン操作で自由なタイミング・量で半田を投入できるようにした．図５は実際に熟練者が本システムを用いて行った半田付けの様子である．



Approach　Heating　Solder feed　Pull out

図５　熟練者の半田付けの様子

②多変量解析に基づく熟練者の作業スキルの抽出

熟練者の作業スキルを抽出するためには，熟練者がどのような状況でどのような判断や動作を行なっているか，また，それがどう結果に繋がったのかを客観的に分析していく必要がある．そこで，遠隔操作ロボットを用いて実施した半田付け作業のデータから，多変量解析の考えに基づいて熟練者の作業を統計的に分析し，隠れた因果関係を明らかにすることを試みた．

十分な数の作業データのサンプルを用意すれば，その中には，その熟練者が持つ作業戦略に共通する状態変化が統計的に多く現れる．そのため，作業の結果を定量評価し，作業段階毎に鏝先温度や鏝の押し当て力といった作業の状態量（説明変量）を定義しておけば，状態量同士，更には作業結果との相関分析を行う事で，どのような作業手順が成功に繋がったのかや何が原因で失敗したのかなどの因果関係を調べて戦略をチャート化することが可能になる．

実際に半田付け作業に本手法を適用し，熟練者の作業戦略の分析を行った．具体的には，多数の半田付けサンプルから結果の評価を数値化し，また，鏝がランドに接触してからの各工程（加熱，半田投入，引き上げ）について作業の状態を表す変量（鏝先温度，鏝の動き，鏝の押し当て力，それらの変化率など）を定義し，図６のように，各工程内でそれぞれの状態量がどのように関係しているか，また，それが次の工程の状態量にどのように影響を与えているか，そして，それが最終結果にどう結びついているかを相関分析によって求めた．その際，結果の評価が高いサンプルデータに共通する相関，評価の低いサンプルに共通する相関などに分けて分析を行うことで，状況に応じて採るべき戦略を明らかにする工夫を行なった．

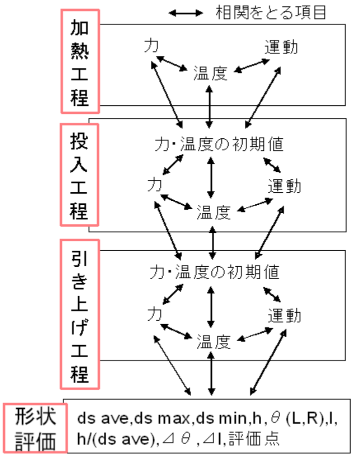



図６　相関分析

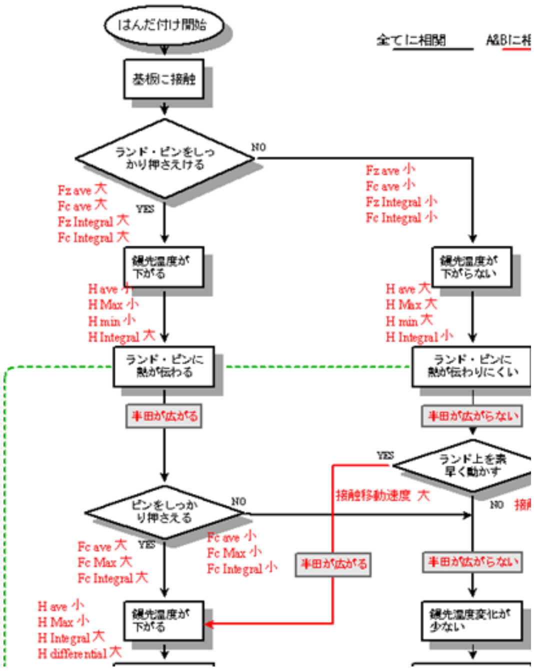



図７　抽出した作業チャート（一部表示）

実験では，熟練者２名に対して採取したデータから，それぞれの相関チャートを作成することに成功した．図７にその一部を示すが，熟練者が鏝の押し当て力を適切に設定している様子や，本来目に見えないはずの鏝先温度をうまく把握して半田の投入や鏝の引き上げを行っている様子をチャート化して確認することに成功した．また，被験者による戦略の違いもチャートに現れ，とても興味深い結果となった．

③非熟練者のための作業支援システムの構築と有効性の確認

熟練者の作業チャートに基づき，決定木のアルゴリズムを用いて，温め工程での望ましい鏝の接触力や，半田投入時の鏝先温度条件等の閾値を求めた．それを元に，作業モニタ上に支援表示を行うシステムを構築して，非熟練者に対する支援効果を検討した．

図８に支援表示の一例を示す．温め工程での鏝の模範接触力になるように追加で加えるべき力を矢印で指示したり，半田の投入タイミングをランプで指示したりする機能を搭載している．

非熟練者に対して支援効果を比較した結果を図９に示す．(a)は支援なし，(b)は支援ありの場合の半田付けの結果の評価値（形状や広がり具合を点数化したもの）を示しており，80 程度が熟練者レベルであることを考えると，大幅な改善がみられ，抽出スキルに基づいた支援システムの有効性が確認できた．

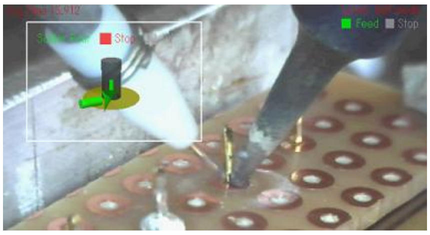
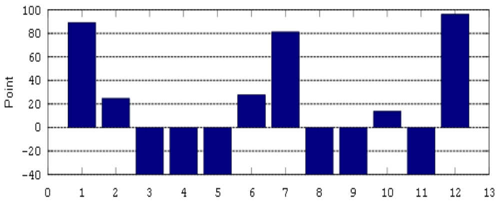
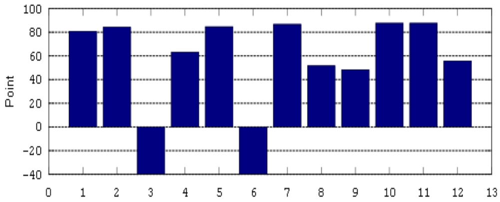



図８　支援表示の様子




(a) 支援なし




(b) 支援あり

図９　作業支援の有効性の検証

(3) センサ部品の組み立てスキルの抽出と作業支援システムの構築

①センサ部品の組み立てスキルの検討

図２に示したセンサ部品（センサケース）の組み立て作業を題材に，熟練作業者の機械作業スキルの検討を行った．対象とした部品はクリアランスが小さく，効率的な組み立てを行うには慣れが必要となり，そこに人の持つ器用な操り技術が現れる．

まず，被験者１２名に図１０のように素手で組み立て作業を繰り返し実施してもらい，習熟後にどのような作業の違いが現れるかを調べた．

すると，作業方法は大きく二つのパターンに分かれることがわかった．パターン１はケース同士を互いに平行になるように細かく合わせてから挿入組み立てを行うもの，パターン２は図１１のようにケースを斜めに押し当てて姿勢を正しながら挿入を同時に行うものである．二つのグループを比較すると，パターン１の方が組み立て時間が長く，パターン２はばらつきも少なく作業が一定していた．さらに，パターン２の被験者の中に，作業時間が短くとても効率的に組み立てを行うことのできる者がいることもわかった．

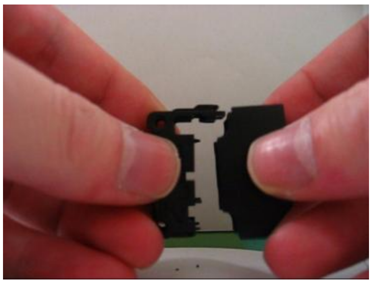


図１０　手作業による部品組み立て

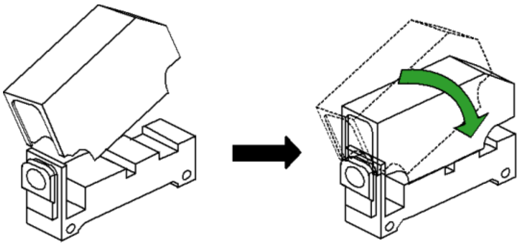


図１１　パターン２の効率的な組み立て

②ロボットを用いた作業データの取得

そこで，図１２のように作業ロボットの手先にセンサ部品（カバー側）を把持させ，被験者には，その部品を掴んで作業台に固定したセンサ部品（台座側）に組み付けるよう指示し，その際の作業データ（作業力，運動，作業時間）を記録した．その際，ロボットは被験者の力によって軽く自然に動かせるように（素手での組み立てスキルが生かせるように），インピーダンス制御を行った．

図１２　ロボットでの作業データ採取

表１　組み立て時間の比較

| 被験者 | パターン | 最短時間 | 平均 | 標準偏差 |
|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 2.58 | 4.71 | 1.82 |
| B | 1 | 4.76 | 6.89 | 2.00 |
| C | 2 | 2.58 | 4.16 | 1.3 |
| D | 2 | 1.72 | 4.28 | 1.55 |

実験の結果，表１のようにパターン１の被験者に比べ，パターン２の被験者の方が平均作業時間が短く，作業のばらつきも少ないことが確認できた．中でも被験者Ｃは他と比べて明らかに効率の良い組み付けを行っているように感じられた．そこで，作業力や部品の動きを作業データから調べたところ，パターン１で作業を行っている被験者 A と B は，各方向について力のモーメントをゼロにするように部品の姿勢を合わせてから挿入・組み立てを行っていることが確認できた．途中で部品がうまく入らないときには，その場でまたモーメントをゼロにするような調整を行っていた．被験者Ｄについても同様で，斜め方向から挿入を開始するものの途中でモーメントを基準とした姿勢合わせを行って，その間挿入が停滞していた．

それに対し，被験者Ｄは挿入（並進運動）とモーメントの補正（回転運動）が同時に行われ，組み立てが完了していた．

③遠隔操作での詳細作業データの取得

前述の実験では，作業者が加えた力と相手部品（台座側）から加わった力とが区別できず，二つの合力としてしか力データを計測できなかった．そこで，被験者に遠隔操作ロボットを用いて同様の作業を行わせ，操作側ロボットのセンサから被験者の手の動きと操作力を，作業側ロボットのセンサから部品の動きと台座との間の作業力を，別々に計測して解析することにした．

表２に，遠隔操作での被験者ＣとＤの作業時間および仕事率をまとめたものを示す．被験者Ｃの作業の効率が明らかに良いことが確認できる．

表３　遠隔操作実験での作業効率の比較

| 被験者 | 最短時間 | 平均時間 | 標準偏差 | 仕事率 |
|---|---|---|---|---|
| C | 2.02 | 2.49 | 0.58 | 0.0280 |
| D | 3.18 | 8.32 | 3.76 | 0.0046 |

作業中の力データを比較して分析したところ，被験者Ｄは操作側で大きなモーメントを発生して能動的に部品の姿勢を補正していたのに対し，効率的な作業を行っている被験者Ｃは操作側ではモーメントを加えておらず，ほとんどの回転力は作業ロボット側だけで発生していた．これは，台座から受ける反力が回転力に変わっていることを意味しており，瞬間回転中心などの詳細な運動解析を行ったところ，被験者Ｃの戦略を次のように明らかにすることができた．

被験者Ｃは，斜めに部品を接触させ，図にFmで示した紫色矢印方向（斜め右下）に並進力を加えていた．すると，その横方向成分（Fmx，右向きの赤色矢印）の反力として，接触点に左向きの反力（Fsx，左向きの赤色矢印）が発生し，この二つが偶力となり（b）のように姿勢が自然に正される．残った下向きの力（Fmz）は部品の押し込みに使われる．もし，（c）のように姿勢が補正されすぎた場合には偶力は反対向きに働き，姿勢は水平に自然に保たれるため，被験者は斜め方向に力を加えているだけで，姿勢の保持と挿入・組み立てが同時に進行し，効率の良い組み立てが行われていた．

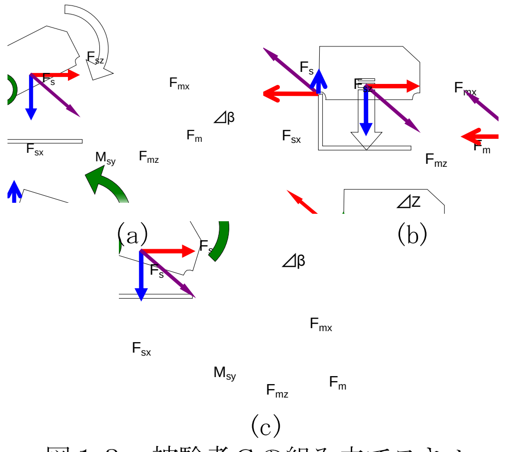



図１３　被験者Ｃの組み立てスキル

④作業支援および自動化による効果の検証

明らかになった被験者Ｃの作業スキルを用いて，被験者Ｄの作業支援を試みた．部品が斜めに接触した後，遠隔操作ロボットのモニタ画面上に発生すべき力を表示し，被験者にはその力を目標に作業を行うように指示した．また，被験者Ｃの作業戦略をロボットに実装し，組み立ての自動化も試みた．その結果，被験者Ｄの作業効率は大幅に向上し，また，自動化の場合も一定の力を発生するだけという非常に単純な制御則で被験者Ｃに近い効率の良い作業を行えることが確認できた．

表４　操作支援および自動化による検証

| | 平均仕事率[W] |
|---|---|
| 被験者Ｃ | 0.0280 |
| 誤差なし自動化 | 0.0234 |
| 被験者Ｄ（支援有） | 0.0130 |
| 被験者Ｄ（支援無） | 0.0046 |

これらの成果は，作業スキルの抽出・実装による今後の応用の可能性を示唆するもので，今後様々な要素作業についてスキル抽出を行い，それをデータベース化することで，効率的な協調型セル生産システムを構築したいと考えている．

## ５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計０件）

〔学会発表〕（計２件）

(1) 伊藤友孝，石川純也，高橋亮佑，伊藤陽介，渡邊庸介，遠隔操作ロボットを用いた熟練者の作業スキル抽出に関する研究−スキル抽出のためのマスタ・スレーブ型作業システムの構築−，日本機械学会東海支部総会講演会，2010年３月９日，名古屋．

(2) 伊藤友孝，伊藤陽介，渡邊庸介，石川純也，高橋亮佑，遠隔操作ロボットを用いた熟練者の作業スキル抽出に関する研究−自動半田付けロボットへの応用を目指した半田付けスキルの実験的検討−，日本機械学会東海支部総会講演会，2010年３月９日，名古屋．

〔図書〕（計０件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計０件）

○取得状況（計０件）

〔その他〕

## ６．研究組織

(1) 研究代表者

伊藤　友孝（ITO TOMOTAKA）
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号：００２８３３４１

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし