

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23700227

研究課題名(和文)複数アームによる曲げ・ねじり剛性を有する線状柔軟物のマニピュレーション技術の確立

研究課題名(英文) Manipulation of deformable linear objects characterized by bending and torsional stiffness

研究代表者

姜 欣 (JIANG, XIN)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30451537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：この研究は複数のロボットアームが協調しながら一本のワイヤーハーネスを自動車のボディに組み付ける方法を研究した。この研究によって、作業に伴うワイヤーハーネスの振る舞いまで考慮したロボットの作業計画法を提案した。また、作業全体を見張るセンサ、複雑なセンシングアルゴリズムがない条件下での実装を考え、ワイヤーハーネスをなぞりながら形状、またその上にあるクランプの位置を認識していく方法を提案した。検証実験により、本研究で提案された方法が将来実現場におけるワイヤーハーネスの組み付け自動化にコスト、信頼性ともに向上させたの一つの方法と思われる。

研究成果の概要(英文)：This research was focused on finding methods for automatically mating a wire harness onto a car body utilizing multiple robot manipulators. For the purpose, a method was proposed for robot motion planning, which is characterized by taking effect of wire dynamics into account. In addition, a new method was also proposed for simplify the problem of wire state recognition. The method imitated the behavior of human when he has to find a plug on a cable blindly. In this way, by tracing the wire segment with the griper, it is possible to recognize the shape and state of a wire harness. From the conducted verification experiments, the effectiveness of the proposal was proved.

研究分野：産業ロボット

キーワード：組立自動化 柔軟物ハンドリング

1. 研究開始当初の背景

最近、コスト削減を背景に、生産システムのロボット化がさらに進み、従来では実現困難とされた分野に新たな試みが始まっている。その中の一つは、ワイヤーハーネス、コネクタ付きのケーブルのような柔軟変形物の取り付け作業をロボットで自動化させるといった課題である。現在の工場には、このような柔らかく変形しやすいものを扱う作業が大量に存在する。ただ、操作に伴い、対象物が変形する特性がこのような作業の完全自動化に困難をもたらす。実際の現場では、この種の作業のほとんどが人間の手作業に頼っている。研究代表者らは以前、NEDOプロジェクト「柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステム（次世代産業ロボット分野）」（2006～2009年）を担当し、スズキ（株）の生産ラインを対象としたワイヤーハーネスの組み付け用ロボットシステムを開発した。そのプロジェクトはワイヤーハーネスの自動取り付けデモを成功させたものの、多くの課題が残された。その課題を理論的に分析し、線状柔軟物の自動操作に対してより汎用性の理論を提案することがこの研究申請のきっかけであった。

2. 研究の目的

工場の現場にワイヤーハーネスの自動組み付けを実現させるためには理論的に以下の問題の解決が不可欠である。（1）目的とする作業を実現させるロボットの動作シーケンスを自動的に生成する方法（2）作業の進行に伴い、必要となるワイヤーの状態を制御する方法（3）センサ情報を用いたワイヤーハーネスの状態認識する方法。これらの課題を解くことにあたって、本研究は複数ロボットアームの使用、ワイヤーハーネスの曲げ・ねじり変化制御といった先行研究にな特徴を持つ。さらに、将来開発した技術を生産現場に適用することを考え、本研究では技術実現のコスト、信頼性も提案手法の評価に考慮された。

3. 研究の方法

（1）曲げ・ねじり剛性を考慮した線状柔軟物の作業計画

ワイヤーハーネスの組み付けはその上に付いている複数の固定用クランプを自動車ボディにある固定用穴に挿入することで行われている。通常、作業台の周りにワイヤー或いは作業ロボットに引っ掛かる障害物が存在するため、ロボットの動作を事前設計する必要がある。剛体対象物の場合と違い、柔軟変形物の場合、実行中変形の具合も考慮する必要がある。

作業計画に関する研究がシミュレータを用いて行われた。具体的に、ワイヤーのような柔軟物の作業におけるねじり、曲げ変形を表現できるように、ワイヤーの動力学モデルを組み込んだ。このモデルに、ワイヤーが質点とそれを繋ぐバネとしてモデリングされている。また、ねじり状態を表現するために、

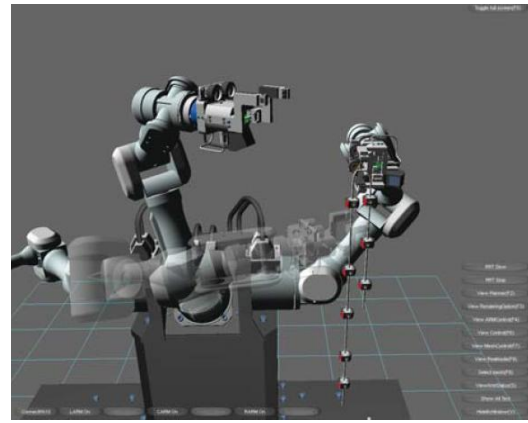


図1. ワイヤの曲げ・ねじり変形の表現を加えた作業計画シミュレータ。

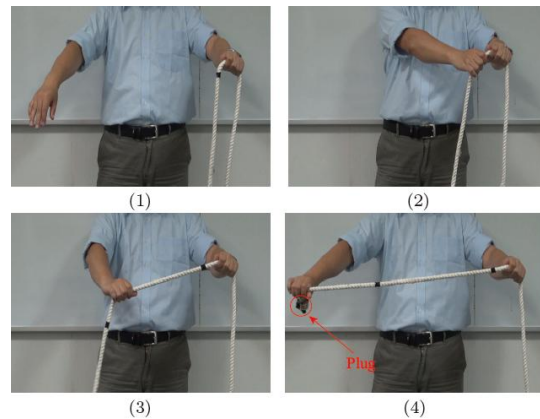


図2. 目視なしでケーブルに付くプラグを探す動作。

質点間に伸び方向のほか、ねじり方向にもバネを配置している。作業計画シミュレータにワイヤーの動力学モデルが反映された。作業計画のアルゴリズムとして、RRT (Rapidly-exploring Random Tree) に改造を加えたものが使用された。具体的に、RRTにおける状態定義にワイヤー形状を決める各質点の状態を加えた。これによって、ワイヤーの一部がロボットに把持されたり、環境に引っ掛かるなどのような状態もサンプリングされるようになった。例えば、ワイヤーが両手で把持された場合、垂れる部分振る舞いは、把持点の状態遷移とともにワイヤーの動力学モデルから算出される。RRTにワイヤー動力学モデルを加えたことによって、ロボットの動作がワイヤーの変形に与える影響を含め、作業シーケンスのあらゆる状態がサンプリングされるようになった。

（2）なぞり動作を用いたワイヤーハーネスの自動組み付け

ロボットによるワイヤーハーネスの自動取り付けにおける課題の中に、作業計画の他に、いかに少ないコストで信頼性の高いシステムを作り上げることも重要である。従来の研究では、ワイヤーの形状を完全に認識できることを仮定されていた。そのため、多くの研究に視覚センサが導入されている。このような方法でワイヤーの状態を認識するのに、セ

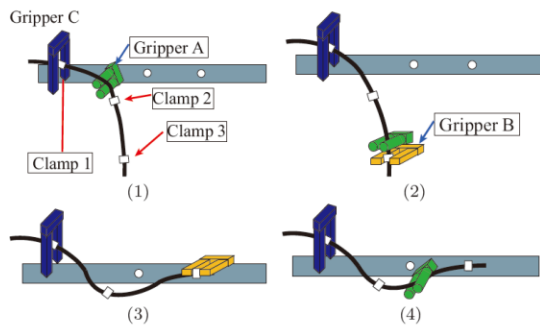


図 3. なぞり動作を用いたワイヤーハーネスの取り付け.

ンシングが複雑になるため、コストが高い一方信頼性も上げられない。そこで、本研究は人間の動作を模倣するなぞり動作の導入を提案した。

図 2 に示すように、暗闇で人間がケーブルに付いたプラグを探すような場面が日常生活によく見受けられる。この動作において、人間は視覚情報が得られない状況であってもケーブルをたぐりよ寄せ、表面に沿ってなぞっていくことでプラグまで到達している。ロボット工学の観点から、このごく普通の動作がワイヤーハーネスの取り付け問題にスマートな方法を教えている。ロボットが同じことを真似すれば、視覚センサなしでの取り付けの可能性を示している。

なぞり動作をワイヤーハーネスの取り付けに取り入れたら、シーケンスがどう変わるかが図 3 に示されている。この例において、三つのグripper A, B, C (本研究に使用されたシステムに三本のロボットアームが装備されている) がワイヤーに付いたクランプ 1, 2, 3 を取り付けるシナリオを考える。最初、グripper A がワイヤーをなぞって、クランプ 3 を特定する。グripper がワイヤーに移動する際、感じた凹凸及びなぞった距離の情報から、「遭遇した二番目に大きい凹凸」、「なぞった距離がちょうどクランプ 3 までの距離」といった二つの条件を満たすところでクランプ 3 が特定できる。同じように、クランプ 3 から逆の方向にワイヤーを辿りつければ、クランプ 2, 1 の特定および取り付けが簡単にできることがわかる。本研究は図 3 にしめすアイデアを実際のロボットで実現させた。

4. 研究成果

(1) 線状柔軟物作業計画における成果

開発したアルゴリズムがワイヤーハーネスの取り付けシミュレータに適用された。シミュレーションの条件は図 4 に示す。取り付け開始時、ワイヤーハーネスが図 4 (a) のようにハンガーに掛けられる状態である。目標状態は図 4 (c) に示すようにインパネフレームに三つのクランプがそれぞれ決められた取り付け穴に装着完了した状態に設定されている。この条件でシミュレーションが行われたところ、計画動作結果が出るまで 1 分 30 秒かかったことが分かった。(使用された

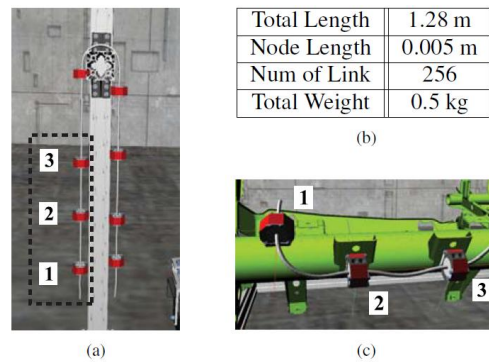
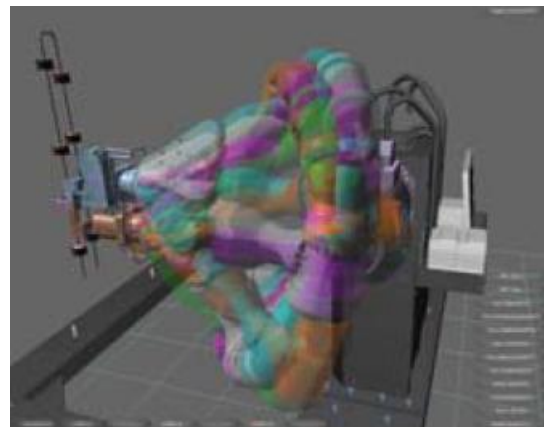
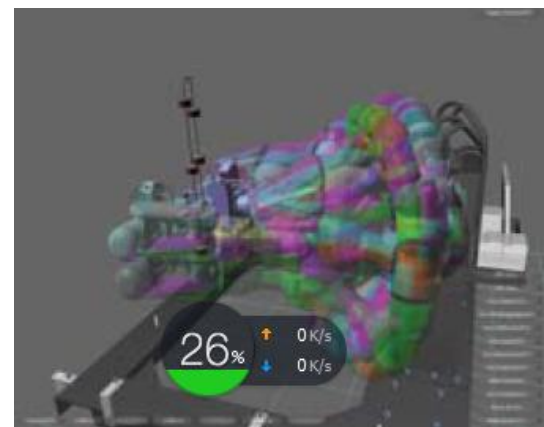


図 4. シミュレーション条件



(a) クランプ把持位置の探索



(b) ワイヤー把持位置の探索

図 5. 開発したアルゴリズムによる把持位置の探索

PC スペック : Intel Xeon X5482 3.2GHz (× 2)、16GB メモリ、OS : Windows7 (64bit)。

図 5 は把持位置を探す様子である。

(2) なぞり動作を用いたワイヤーハーネスの自動取り付けにおける成果

① グリッパーの改造

提案したなぞり動作を用いた取り付け方法を検証するために、グリッパーの改造を行った。図 6 に示すのは試作された二種類のグリッパーである。本研究では、ワイヤーを把持した後、その表面をなぞって目標クランプを辿りつくという使い方が想定されているため、グリッパーにローラが装備されていた。グリッパーの開閉、手先のローラを使ってワ

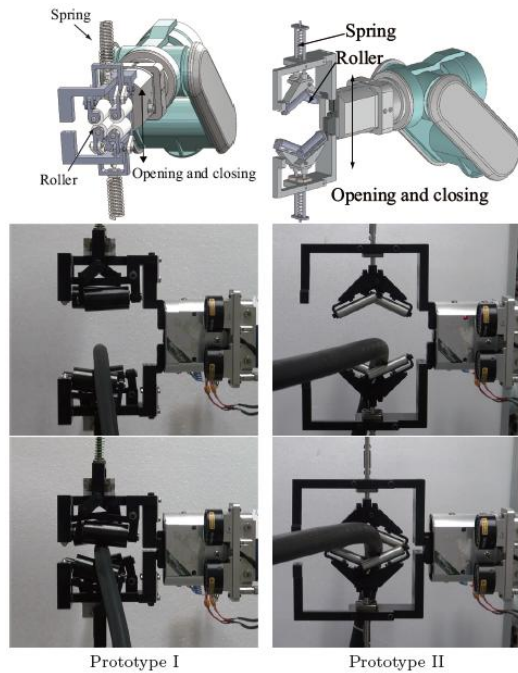


図 6. 試作したグripper

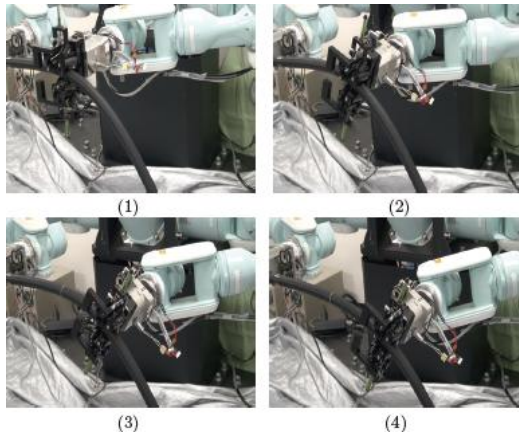


図 7. ゴムホースをなぞる様子（力制御を取り入れたことによって、グripperがほぼホースの垂れた形に沿っている）

ワイヤーをなぞる様子が図 6 に示されている。

②ワイヤー動作における力制御

実際に使用されているワイヤーハーネスの太い部分かなりの剛性を持つ。そのため、動作中、グripperがキレイに表面をなぞらなければ、無理矢理にワイヤーをひっぱたりすると過大な力が発生する怖れがある。この目的に、力制御手法も開発された。その方法の原理が「手首力センサからの情報を利用することでいつもワイヤーの接線方向に力が出るように」グripperの姿勢を調整するという考えである。この方法によって、グripperがワイヤーの曲がった形にきれいに移動することができるようになった。ゴムコースを使った検証実験の様子は図 7 に示す。

③なぞり動作を用いたワイヤーハーネスの認識

人間の動作が示すように、ワイヤーをなぞった際、表面から感じた凹凸情報となぞった距離を合わせれば、理論上ワイヤーの形状の



図 8. コムホースに結束バンドを付けることで実際のワイヤーハーネスの表面凹凸を表現した。（右の図にある赤い点に結束バンドが取り付けられている）

推定も可能である。このアイデアが開発したグripperを使い、評価された。実験中、我々がゴムホースを実際のワイヤーハーネスの代わりとして使用した。また、ゴムホースの表面凹凸は、図 8 に示すように、結束バンドをつけることで模擬した。実際のワイヤーハーネスは設計図のもとに作られた製品であるため、結束バンド、クランプのワイヤー上の位置、分岐などの情報が既知と仮定されている。評価実験では以下の項目を実施した。

● 与えたクランプまで辿りつけるか

図 8 のように、スタート点からなぞり途中で発生した力（凹凸）と辿った距離をモニタリングすることで、目標クランプ位置に自動停止するかの評価実験を行った。結果として、グripperがほぼ正確の位置に止まったことが分かった。

● ワイヤーに対する認識が複数アーム間の伝達

その後、実際の取り付けを想定したより複雑なデモも行った。図 9 に示したは複数のロボットアーム間、なぞりによるワイヤー認識を引き継ぐものである。ここで想定したのが複数ロボットアーム間の協調作業で、取り付け作業が一本のアームから別のアームに移行する場合、認識してきた情報がアーム間伝達することである。これによって、同じワイヤーハーネスの異なった部分で作業するアームがそれぞれ認識した対象物の情報を足し合わせることによって、ワイヤー全体の状態が測れる。つまり、作業の全体を見張るセンサがなくても、それぞれ局所で認識したものが合わせられる。図 9 に示す実験に、左手からもらったゴムホースの情報のもとに、取り付けが右のアームに移って、同じゴムコースの残った部分にあるクランプを正確に把持できたことが証明された。

● なぞり動作が分岐を跨ぐ

図 10 に示したのがワイヤーハーネス組み付けにおけるもっと複雑な場合である。実際に使用されるワイヤーハーネスは分岐を持つ。ハンドに装着したローラでワイヤーをなぞる我々の方法にもこういった分岐を跨ぐ機能が求められる。実際行った実験検証から、ワイヤー認識、組み付けの引き継ぎが分岐を跨ぐことが分かった。

以上の検証実験によって、提案されたなぞり動作を用いたワイヤーハーネスの認識法が実際有効であることが分かった。この方法

がグローバル的に作業場を見らるセンサ、複雑なアルゴリズムが必要ないため、実際に生産現場におけるワイヤーハーネスの自動組み付け問題に低コストかつ信頼性の高い方法を示した。

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 2 件)

- ① Xin Jiang, Yuki Nagaoka, Kazushi Ishii, Satoko Abiko, Tepei Tsujita, Masaru Uchiyama, "Robotized recognition of a wire harness utilizing tracing operation", *Robotic and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.34, pp.52-61, 査読有, 2015.
DOI : [10.1016/j.rcim.2014.12.002](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.12.002)

- ② Kyongmo Koo, Xin Jiang, Atsushi Konno, and Masaru Uchiyama, "Development of a Wire Harness Assembly Motion Planner", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 23, No.6, pp. 907-918, 査読有, 2011.

[学会発表] (計 2 件)

- ① 長岡 雄輝, 石井 一紫, 姜 欣, 安孫子 聡子, 辻田 哲平, 内山 勝: ワイヤーハーネス組付作業に向けたなぞり動作による形状認識手法の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会'14講演論文集, 日本機械学会, (2014/5/25-29), 3P2-L02, 富山県富山市, 富山市総合体育館.
- ② 長岡 雄輝, 姜 欣, 辻田 哲平, 安孫子 聡子, 内山 勝: ロボットアームを用いたなぞり作業による線状柔軟物の組付作業, 第14回SICEシステムインテグレーション部門講演会論文集(2013/12/18-20), 3L2-5, 兵庫県神戸市, 神戸国際会議場.

[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]

アメリカのオンライン雑誌 *Assembly* の 2015 年 7 月号に、ワイヤーハーネス組み付け用ロボットの開発を紹介した記事が掲載された。

<http://www.assemblymag.com/articles/topic/2642-robotics-assembly>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

姜 欣 (Jiang, Xin)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 30451537

(2) 研究協力者

Kyongmo Koo (東北大学 大学院工学研究科)

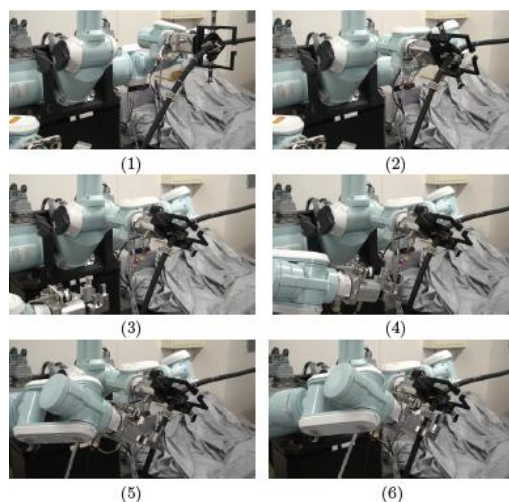


図 9. 複数のロボットアーム間のなぞりによるワイヤーの認識を引き継ぐ実験.

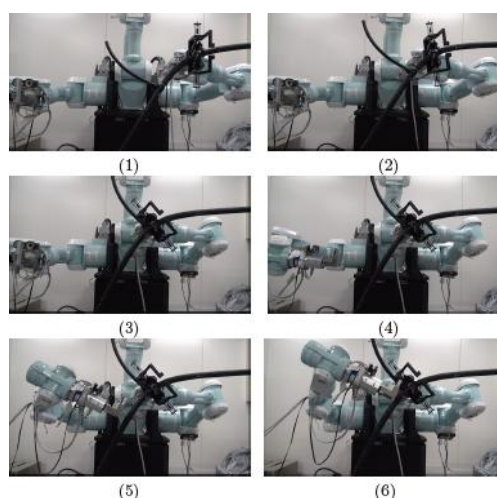


図 10. 分岐を跨いで目標クランプを把持する

航空宇宙工学専攻 2011 年 9 月博士修了)

長岡 雄輝 (Yuki Nagaoka、東北大学 大学院工学研究科 機械システムデザイン専攻 2014 年 3 月修士終了)

石井 一紫 (Kazushi Ishii、東北大学 機械システムデザイン専攻 2014 年 3 月学部修了)