

2010 年度

東京大学 人工物工学研究センター
サービス工学研究部門

移動ロボティクス研究室 (太田研究室) 研究紹介

〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
東京大学柏キャンパス総合研究棟 5F

TEL

教授室 509 : 04-7136-4252

研究室 559、561 : 04-7136-4260

研究室 534A : 04-7136-4276

FAX: 04-7136-4242

URL: <http://www.race.u-tokyo.ac.jp/otalab/index-j.htm>

メンバー

教授	太田 順
特任研究員	Lounell Bahoy Gueta
博士課程学生	Yewguan Soo, 深澤 佑介, 劉 兆甲, 黄 沿江
修士課程学生	李 天, 大山 直樹, 武部 芳弘, 中西 悠斗, 溝垣 忠信, 小川 広晃, 狩谷 有亮, 龔 奕衡 (キョウエキコウ), Theeraphol WATTANAVEKIN
学部 4 年生	鴨川 寛正, 米辻 泰山
秘書	平田 真理, 田村 美香

研究の概要

我々は 1989 年から群知能ロボットの研究を行ってきました。我々は、「ある空間に滞在し、動作している人間」、「人間を支援する知的エージェントとしてのロボット」、「ロボットと人間が相互作用する環境」の三者から構成される系を考えてきました。我々は、動作計画手法、進化的計算、最適化学、制御工学等を理論的基盤として、ロボット工学、サービス工学、生産システム工学に関する研究プロジェクトを遂行しています。最終的には人間と相互作用し人間を支援するエージェントの知能並びに運動・移動機能を解明し、人を含むマルチエージェントシステム設計論の構築を目指します。現在は「マルチエージェントロボット」、「大規模生産／搬送システム設計と支援」「移動知、人の解析と人へのサービス」という 3 つの分野において研究を行っています。

具体的には以下のテーマについて研究を進めています。

- 複数ロボットを用いた可動物体搬送作業 3
- 冗長マニピュレータシステムのコンパクトな動作生成 4
- 自動倉庫における 2 台のスタックークレーンの協調動作生成法 5
- 時間を考慮した非対称 TSP (ATSP-TW) の解法 6
- 人間の姿勢制御モデル構築に関する基礎研究 7
- 筋電情報を用いた作業者の定量的疲労計測 8
- 病院での看護業務支援 9
- Attentive Workbench: 手を差し伸べる組み立てシステム 10
- Web からの実世界行動モデルの構築とその応用 11

複数ロボットを用いた可動物体搬送作業

群ロボットにより可動物体を初期位置から目標位置まで運ぶ再配置作業は生産現場における資材搬送などのアプリケーションに含まれる基本的な作業である (Fig. 1). 物体の搬送順序から、具体的な搬送経路の構築までを計画対象とするため、ガイドラインを必要とする従来型の AGV システムよりもより柔軟な生産システムの構築に寄与することが出来る. 複数のロボット・可動物体が関わる非常に複雑な作業であるために、従来法を用いてロボットの行動計画を立案することが計算時間の観点から難しい. また、ロボットが構築した環境モデルと実際の環境の間には動的な差異があり、立案した計画を実機で実現するためにはこの差異に対応する必要がある.

計画立案の段階においては、ロボット・可動物体・固定障害物が複雑に込み合った作業環境では、“Territorial Approach” と呼ぶ手法によって「群ロボットによる再配置問題」を「Project Scheduling Problem (以下 PSP)」というある種のスケジューリング問題と、「単体ロボットの経路計画問題」の組み合わせで表現できるようなモデル化を行う¹⁾. これにより複雑に込み合った作業環境でも現実的な時間で再配置計画を立案することが可能である. 一方、複雑に込み合っていない作業環境にも効率的であるように、作業環境に応じた作業の役割分担を行う研究もなされている²⁾. また、実機による実現の段階においては、立案された計画をいくつかの“行動要素”に分割し、行動ごとに誤差への対応を行う (Fig. 2).

Keywords : 群移動ロボット, 再配置作業, 環境の動的変動

References

- 1) Norisuke Fujii, Reiko Inoue, Yoshihiro Takebe and Jun Ota, Multiple Robot Rearrangement Planning Using a Territorial Approach and an Extended Project Scheduling Problem Solver, *Advanced Robotics*, 24, 1-2, p103-p122, 2010.
- 2) 大山 直樹, 藤井 紀輔, 太田 順, 作業領域分割と割付ロボット台数決定手法を用いた群ロボットによる物体再配置作業, 計測自動制御学会第 10 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2009) 講演論文集, p2027-p2030, 2009.

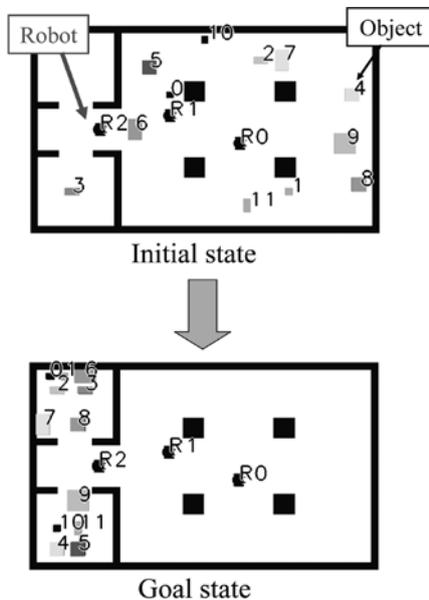


Fig.1 An example of Rearrangement Task.



Fig.2 An experience in real environment.

冗長マニピュレータシステムのコンパクトな動作生成

マニピュレータシステムには、高速高生産性に加えて専有面積をできるだけ小さくするという要求仕様が存在する。この実現は、生産ライン全体のコンパクト化を可能とするため、非常に有用である。しかしながら、これら二つの要求仕様を満たすことは、障害物回避、高速動作生成、可動領域の最小化等相反する複数の評価指標を同時に適切に設計する必要があり解決が困難である。本研究では、6自由度マニピュレータと1自由度回転テーブルから構成された冗長マニピュレータシステムを例として、その設計則の提案を目指している。まず、システムのコンパクトさを表現する新しい指標としてマニピュレータの掃引体積を採用した。マニピュレータは自身の設置箇所に比べて広い作業領域を有する (Fig.1) ため、この指標は有用である。次に、新たに空間重視型協調動作生成則 (spatial motion coordination, SMC) を提案し、ロボットのベース位置設計ならびにゴール巡回順路設計則を提案した (Fig. 2)。最後に、提案手法の有効性を示すシミュレーション実験を行った。問題設定として、システムスループットの充足という観点から作業達成時間 ($t_{desired}$) を制約条件として与えることとし、様々な作業達成時間制約における評価を行った。コンパクト設計をしていない従来手法と比較して提案手法は 28%掃引領域を減少させることができ (Fig.3), 手法の有効性を示した。また、動作生成則の評価としては、作業達成時間が比較的長い時には SMC が良好であり、逆に短い時には時間重視型協調動作生成則 (temporal motion coordination, TMC) が良い結果をもたらすことを確認した (Fig.4)。

Keywords : 多点ゴール到達問題, マニピュレータ動作最適化。

References

1) L. B. Gueta, R. Chiba, T. Arai, T. Ueyama and J. Ota, Compact Design of Work Cell with Robot Arm and Positioning Table Under a Task Completion Time Constraint, Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 807 – 813 (2009).

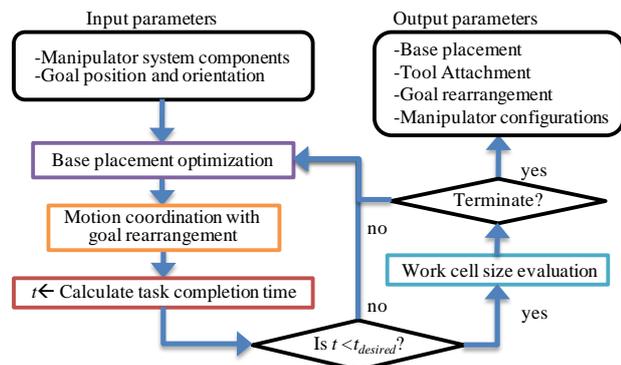
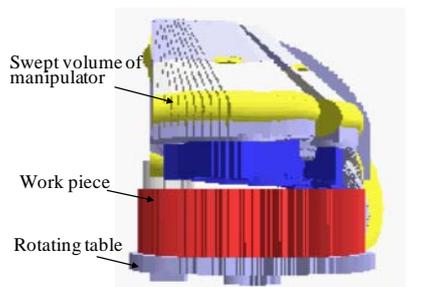


Fig. 2 Proposed method

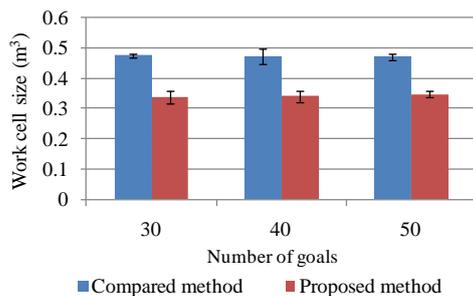


Fig. 3 Average work cell size derived by the compared and proposed methods.

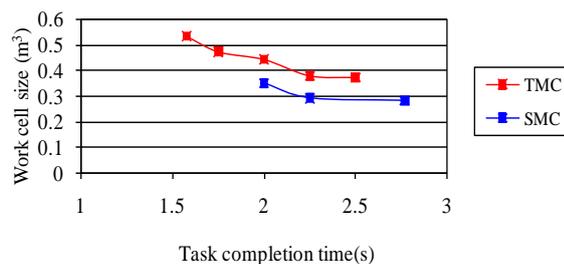


Fig. 4 Performance of SMC and TMC under various $t_{desired}$ settings

自動倉庫における2台のスタックークレーンの協調動作生成法

立体自動倉庫環境下において、二台のスタックークレーンが衝突回避を行いながら高速に作業を行うための動作生成手法を提案した。これまで、複数台クレーンによる作業領域を共有しての作業はなされてこなかった。そこで本研究では、複数台クレーンが協調する動作計画問題を扱った (Fig. 1)。クレーンには逐次オンラインで作業が休みなく与えられるため、動作計画は数秒以内という短時間で行わなければならない。他方で、スタックークレーンは振動制御の観点から、生成される軌道に制約が加わる。これらの問題に対し、本研究では以下のアプローチをとった。まず、最短時間での移動が保証されたフェーズと、保証されないフェーズに問題を切り分けた。最短時間移動が保証される場合には、軌道の制約を利用した衝突回避手法を提案した。一方、最短時間で衝突が回避できない場合には、ヒューリスティクスを適用することで衝突回避を行った。動作計画の設計パラメータは経路点の座標と各点における待ち時間であるが、本問題では、一回の動作計画での計算時間を抑えるために、パラメータの数を限定し、ヒューリスティクスにより高速導解を実現した (Fig. 2)。シミュレーション実験を行い、1台の場合、2台で障害物回避を無視した場合、2台で単純な回避戦略を用いた方法、提案手法を比較した。その結果をTable 1に示す。当然のことながら障害物回避を無視した場合には作業効率は1台の場合のほぼ2倍となる。一方、単純な回避戦略を用いた場合の効率は1.68倍であるのに対して、提案手法を用いた場合には1.85倍の効率を得た。また計画に要する時間は数秒単位であり、十分短かった。これより提案手法の有効性を示すことができた。

Keywords : 動作計画, スタックークレーン, ヒューリスティクス

Reference

- 1) Hisato Hino, Yoshimasa Kobayashi, Toshimitsu Higashi and Jun Ota, Control Methodology of Stacker Cranes for Collision Avoidance Considering Dynamics in a Warehouse, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2009)*, 983/988 (2009).

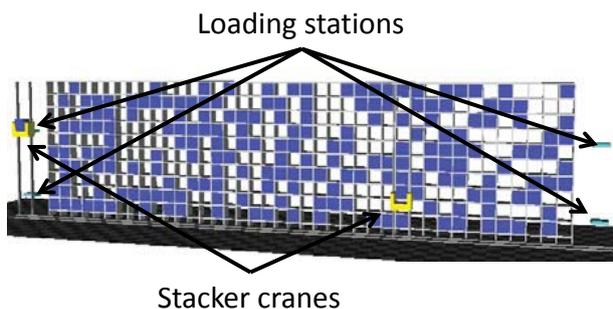


Fig. 1 automated storage/retrieval system with two stacker cranes

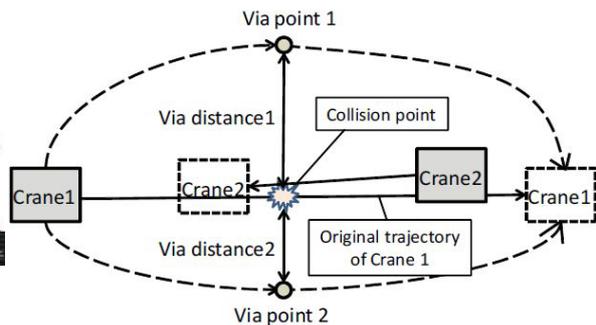


Fig. 2 How to derive the via points

Table 1: Simulation results

	Work time (min.)	Working efficiency	Movement distance (km)	Waiting time (min.)
Single crane	15.49	1.0	2.43	0
Ignore collisions	7.83	1.98	1.25	0
Simple method	9.21	1.68	1.30	1.28
Proposed method	8.39	1.85	1.24	0.50

時間を考慮した非対称TSP (ATSP-TW) の解法

巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem, TSP) とは, n 個の都市を 1 回ずつ通る巡回路のうち, 移動コスト最小のものを求める問題である (Fig. 1). 巡回セールスマン問題のうち, 都市 i から都市 j への移動コストと j から i へのコストが異なる場合を非対称 TSP (Asymmetric TSP, ATSP) と言う. 移動コストだけでなく移動時間や各都市での滞在時間が定義され, 各都市を通過すべき時間幅が制約として与えられている問題のことを時間制約つき TSP (TSP with Time Window, TSP-TW) という. これらは組合せ最適化問題であり, 最適解を多項式時間で求めるのは不可能だと考えられている.

本研究では時間制約つき非対称 TSP (ATSP-TW) を扱う. Fig.2 に ATSP-TW の定式化を示す. ATSP-TW の具体例としては, 製鉄所におけるスラブ圧延順序決定問題がある. 様々な幅と厚みを持つ多数のスラブを続けて圧延する際, 隣り合うスラブの厚みや幅の違いによって製品の品質低下が起こり, その結果コストが上昇する. このコストは幅や厚みの差が大きいほど増大するが, 非対称であり, 例えば 2 枚のスラブで幅の広い方から狭い方を圧延する場合, 逆順よりもコストが低くなる. 各スラブの処理時間と納期を考慮し, コストが最小になる圧延順序を求めるのがスラブ圧延順序決定問題である.

本研究では, 都市数300程度の大規模なATSP-TWに対し, 5分程度の時間で準最適解を求めることを目標としている. 時間制約を目的関数に組み入れて緩和し, メタヒューリスティクス的一种である擬似焼きなまし法 (Simulated Annealing, SA) を適用して解を求める方法を現在試みている.

Keywords : 時間制約, 非対称 TSP, メタヒューリスティクス

References

- 1) 溝垣 忠信, 杉 正夫, 永井 秀稔, 山本 政, 王 曉麒, 太田 順 “時間制約のある非対称巡回セールスマン問題の解法,” 第 22 回自律分散システムシンポジウム資料, pp. 315-320, 2010.

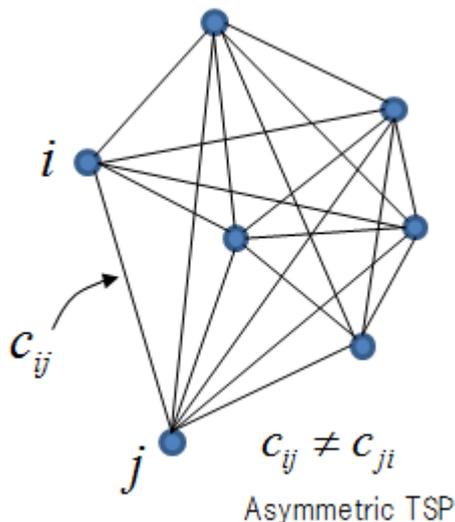


Fig.1 Graph Expression of the TSP

Formulation

$$\min \sum_{i=1}^{n-1} c_{\rho(i)\rho(i+1)}$$

Subject to

$$V = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$\rho: V \rightarrow V$$

$$r_{\rho(i)} \leq t_{\rho(i)} \leq d_{\rho(i)} \quad (i = 1, \dots, n)$$

Fig.2 Formulation of the ATSP-TW

人間の姿勢制御モデル構築に関する基礎研究

人間は視覚・平衡感覚・体性感覚などの複数の感覚情報から、数百もの筋肉の活動を制御し運動を行っており、人間の運動制御は多入力・多出力の非常に複雑な制御である。その脳内を含んだ制御系の解明は医学的・生物学的にも非常に有意義である。しかしながら、脳内の活動を直接測定することは困難である。そこで、脳内の活動の推定を測定可能なものから、モデル化を通じて行う必要がある。

本研究では、起立直立姿勢時における視覚・平衡感覚・体性感覚を阻害・強調し、筋活動の測定を行うことで、多入力・多出力の関係を得る。ここで、全身の筋肉が姿勢制御に参与しているが、筋電図法 (Electromyography : EMG) では測定できる筋に限られてしまう問題がある。そこで筋骨格シミュレータを用いて 94 箇所筋に対して筋活動度を算出する。具体的には、筋骨格・床反力および姿勢と一部の筋電位を入力として逆動力学解析を行うことにより、筋電位を計測していない筋群の活動度を推定している。

当該計測の有効性を検証するため、起立姿勢時における視覚阻害(閉眼)・平衡感覚阻害(カロリックテスト)・体性感覚強調(外部からの接触)を組み合わせた実験を行った。その結果、阻害・強調による姿勢の変化を確認した (Fig.1)。このとき、姿勢変化時(視覚阻害かつ平衡感覚阻害時)の筋活動度のみならず、通常の起立状態の姿勢とほぼ同様でありながら(視覚阻害かつ平衡感覚阻害かつ体性感覚強調時)、筋活動度が優位に高い筋が多数あることが示された (Fig.2)。これは感覚入力の相違が制御系を通じて筋活動に影響を与えた結果であると考えられ、本研究が有意義であることが確認された。

Keywords: 移動知, 姿勢制御モデル, 筋骨格シミュレータ, 感覚阻害

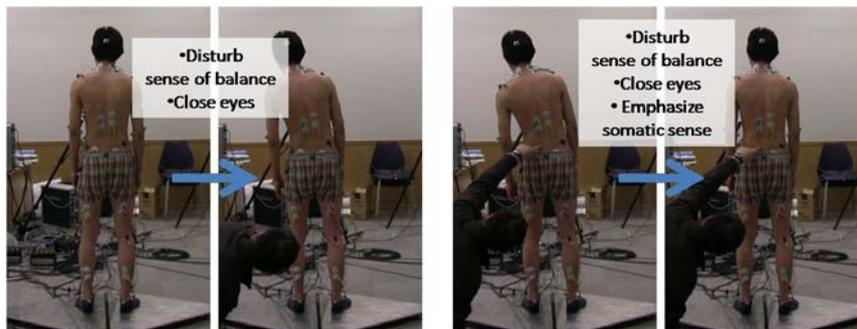


Fig.1 postural changes under sensory input conditions

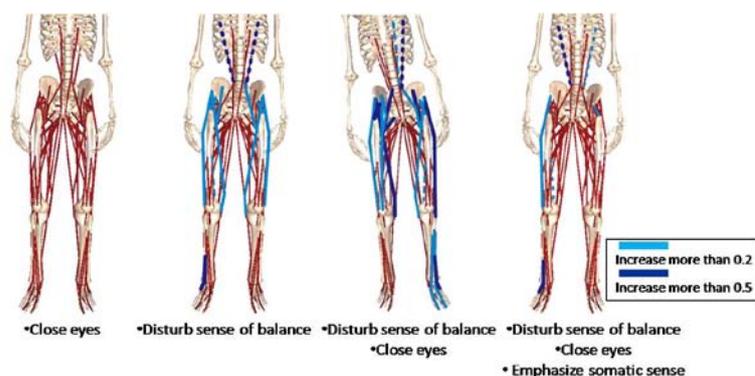


Fig.2 muscle activity compared with normal condition

筋電情報を用いた作業者の定量的疲労計測

単調な繰返し作業を長時間続けることは腰痛や肩こりの原因となり、製造業における作業員にとっては深刻な問題となっている。このことは、人間工学的観点ならびに神経科学的観点から、疲労の定量推定が必要であることを意味している。従来、この分野において、多くの研究がなされてきているが、その定量化は依然として未解決課題である。筋疲労はそもそも数値化が困難であるのみならず、作業内容や個人差、個人の状態に依存する連続的な過程である。ここでは、疲労が増大すると作業員の最大発生力が減少することに着目し、「ある状態における最大発生力」と「無負荷状態における最大発生力」の差異により疲労量を推定する方法を提案している (Fig.1参照)。最大発生力の50%の把持力(50%MVC)を發揮し続ける実験をすることで、上記差異と仕事量との関係を導出し、その関係を指数関数の形式でフィッティングした (Fig.2参照)。既存の周波数領域を用いた方法を用いることで表面筋電位情報 (surface electromyography, SEMG)より把持に伴う仕事量を推定できるため、結果として疲労の定量推定が可能となる。10人の被験者に対する推定結果をFig.3に示す。モニタリングのために最大発生力の差異を力センサにより測った方法と提案手法を比較した結果、有意な統計的な差異 ($p > 0.05$)が見られず、提案手法の有効性が示された。被験者や発生力の大きさが異なると推定モデルも異なるため、同一の被験者でも異なる発生力の場合には、初期キャリブレーションによるパラメータ調整が必要となる。

Keywords: 表面筋電位(surface electromyography), 筋疲労(muscle fatigue)

References

- 1) Y. Soo, M. Sugi, M. Nishino, H. Yokoi, T. Arai, R. Kato, T. Nakamura, and J. Ota, "Quantitative estimation of muscle fatigue using surface electromyography during static muscle contraction," *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 2975-2978, 2009.

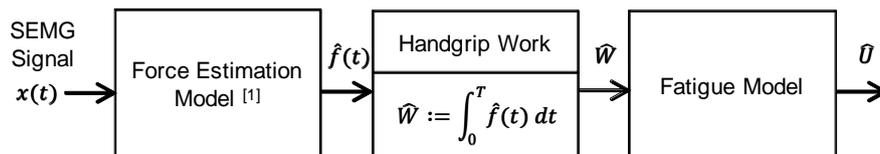


Fig. 1. Process for estimating the degree of muscle fatigue from the SEMG signal. The fatigue model has to be calibrated beforehand for each subject.

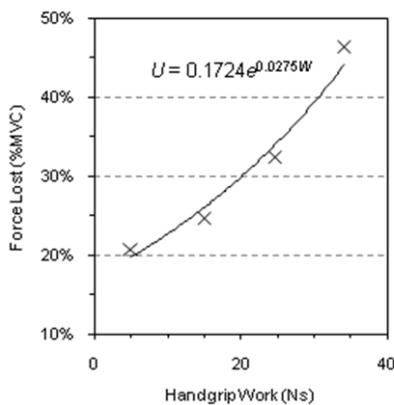


Fig. 2. An example of fatigue model for one subject, which was representing the relationship between the force lost and handgrip work.

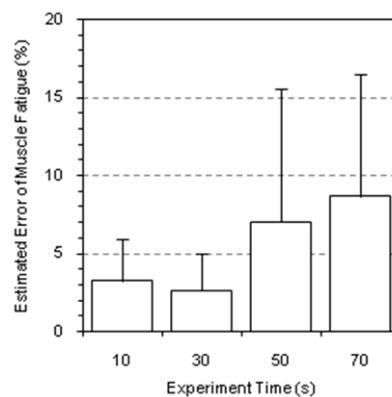


Fig. 3. Mean and standard deviation for 10 subjects, compared between the degrees of muscle fatigue estimated from SEMG signal and the actual value measured using dynamometer.

病院での看護業務支援

病院における看護師の日常業務では、24時間365日にわたって高機能のサービスを常に提供し続ける必要がある。その具体的な内容は手術準備、患者のケア等々多様な種類のものが含まれており、一般的に病院における看護師の業務遂行レベルの向上は、患者へのケアクオリティを向上させ、早期治癒、早期退院へと結びつく。ここでは、そのエンジニアリング的支援を目指して、看護師の行動をオンラインで計測し、その情報と看護師に与えられている業務内容とを照らし合わせて適切な行動手順を看護師にオンラインで教えたり、適切な行動手順と比較することで看護学生の学習を支援したりするシステム(Fig. 1)の構築を最終目標としている。

このうち、適切な行動手順の生成については、看護師が遂行している暗黙のスケジューリングアルゴリズムに類似したアルゴリズムを同定し、看護師スケジューリング問題に適応したSA(Simulated Annealing)ベースの自動スケジューラの開発を行い、その有効性を示した¹⁾。

看護師の行動の計測・記録は、主に加速度センサ(Fig. 2)を用いて行った。看護師の両腕上腕と腰、胸ポケットの4か所に3軸加速度センサを取り付け、得られた波形から特徴量を計算し、SVM(Support Vector Machine)などの手法を用いて行動の識別を行った(Fig. 3)。これにより、加速度センサで看護師の行動を識別できる可能性を示した²⁾。

Keywords: 看護業務, 行動ルール, スケジューリング, パターン認識

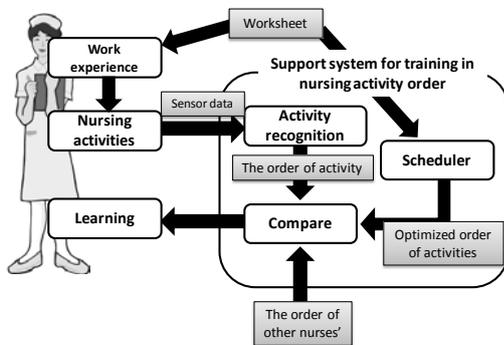


Fig.1 The support system for training in nursing activity order

References

- 1) Mingang Cheng, Hiromi Itoh Ozaku, Noriaki Kuwahara, Kiyoshi Kogure and Jun Ota, Dynamic Scheduling in Inpatient Nursing, Int. J. Automation Technology, 3, 2, 174/184, 2009.
- 2) 武部 芳弘, 金井 Pak 雅子, 桑原 教彰, 太田 順, "加速度センサを用いた看護業務の行動識別", 第22回自律分散システム・シンポジウム講演論文集, 69/74, 2010.

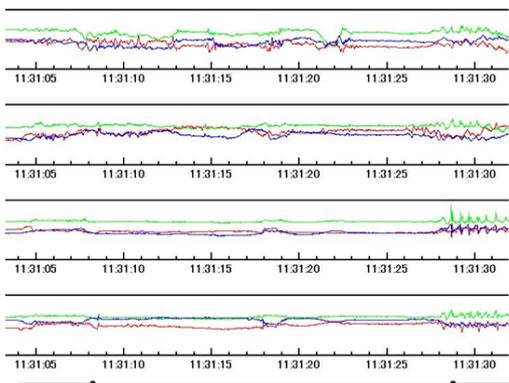


Fig.2 Accelerometer data

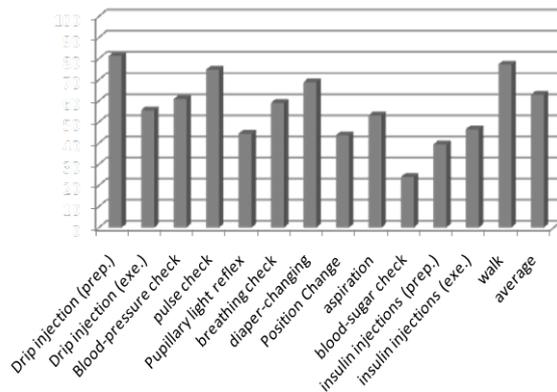


Fig.3 Accuracy of activity recognition

Attentive Workbench: 手を差し伸べる組立システム

今日の生産形態は大量生産から多品種少量生産へと変わりつつあり、特定製品の大量生産に特化した自動化生産ラインに代わり、人間作業者が製品を最初から最後まで生産する“セル生産方式”が用いられるようになってきている。セル生産方式では均質な熟練作業者が多数必要となる。しかし近年、少子化や製造業離れが顕著であり、均質な熟練作業者を確保することは困難になると予想される。

そこで本研究室では、精密機械工学専攻・高増教授、新領域創成科学研究科・小谷講師らと共同で、セル生産方式の作業者を物理面・情報面の両面から支援するシステム Attentive Workbench (気の利く作業台、以下 AWB) の開発を行ってきた (Fig.1)。AWB では、システムは作業者の意図をジェスチャや生体データ (脈拍や呼吸など) から認識する。システムはプロジェクタやディスプレイを用いて作業者に情報 (製品の組立方法など) を提示し、自走トレイ群を用いて組立に必要な部品の手渡しや完成品の片付けなどを行う。これまでに実機システムを実装し (Fig.2)、組立作業支援のデモンストレーションを行った (Fig.3)。また被験者実験により提案システムの有効性を確認した。

また本研究室では、AWB を製造業だけでなく、家庭やオフィスのデスクワークの支援に利用することも試みている。AWB の自走トレイを用いて卓上の物品の片付け/取り出しを支援することで、ユーザは「作業のための準備作業」から解放され、本来行うべき作業に注力できると考えられる。デスクワークの作業は非定型的であり、ユーザが次に何をすべきかがシステムにとって自明ではない。そこで、精度の高いユーザ意図推定方法や、直感性の高い入力インタフェースの研究を行っている。

Keywords: Cell Production System, Attentive Workbench (AWB)

References

- 1) Yusuke Tamura, Masao Sugi, Jun Ota, Tamio Arai: “Target Identification through Human Pointing Gesture Based on Human-Adaptive Approach,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 515-525, 2008.
- 2) Masao Sugi, Ipeei Matsumura, Yusuke Tamura, Makoto Nikaido, Jun Ota, Tamio Arai, Kiyoshi Kotani, Kiyoshi Takamasu, Hiromasa Suzuki, Akio Yamamoto, Yoichi Sato, Seiichi Shin, Fumihiko Kimura: “Quantitative Evaluation of Automatic Parts Delivery in ‘Attentive Workbench’ Supporting Workers in Cell Production,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 21, No. 1, pp. 135-145, 2009.
- 3) Masataka Nishino, Yuto Nakanishi, Masao Sugi, Yewguan Soo, Jun Ota, Tamio Arai: “Design of Gesture Interface for Deskwork Support System,” *Proceedings of the ICROS-SICE International Conference 2009 (ICCAS-SICE 2009)*, pp. 2260-2267, 2009.



Fig. 1 Overview of Attentive Workbench



Fig. 2 Prototype System

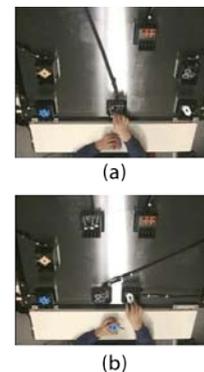


Fig. 3 Demonstration of Physical Assembly Support

Web からの実世界行動モデルの構築とその応用

近年、携帯端末で閲覧可能なコンテンツやメディアは劇的に増加している。乗り換え案内、チケット購入、天気予報、及び災害情報等、実世界でユーザが直面する様々な問題や要望をリアルタイムで解決可能な問題解決型のコンテンツも充実してきている。このようなコンテンツを探しやすくするため、本研究では、Web からユーザの問題解決行動をモデル化したタスクモデルを自動的に獲得する方法を提案する。具体的には、行動モデルの自動構築に向け、行動間の階層関係を自動的に構築する手法を提案した[1][2]。2つの概念間の階層関係を抽出する手法として Turney らは検索 Hit 数を用いた共起度判定手法 (PMI-IR) を提案しており本研究では PMI-IR を拡張し行動間の階層関係に利用している。Fig.1 に Web から抽出した実世界行動モデルを示す。

本研究では、構築した行動モデルをコンテンツの推薦に利用している[3]。内容に基づく推薦方式において、ユーザの実世界行動モデル (タスクモデル) をアイテムおよびユーザのプロファイルとして利用する方法を提案する。既存の単語によるプロファイル表現方法と比較し Precision-recall カープおよび MAE (Mean Absolute Error) の精度向上を実現することができた。さらに本研究では、Web から抽出した行動を用いて、地図ベースの動画視聴アプリケーション TaskGuideRoid を開発した (Fig.2) [4]。TaskGuideRoid は表示されている地図のエリア内でユーザができること (ユーザ行動) から動画を選択することができる。ユーザの行動は、Blog から取得した観光地名と動詞の組み合わせにより獲得している。被験者評価から、TaskGuideRoid は、比較手法 (GoogleMaps の動画視聴インタフェース) に比べ、40 分間の実験で平均 3 個程度、視聴動画個数が増加したことが確認された。特に、ユーザがあまり訪れたことがない地域では 11.2 個 (比較手法は 6.2 個) と 2 倍程度の視聴個数が増加しており、未知の場所に対する興味を高める効果も確認された。

Keywords: Web マイニング、行動モデル、コンテンツ推薦、セマンティック検索

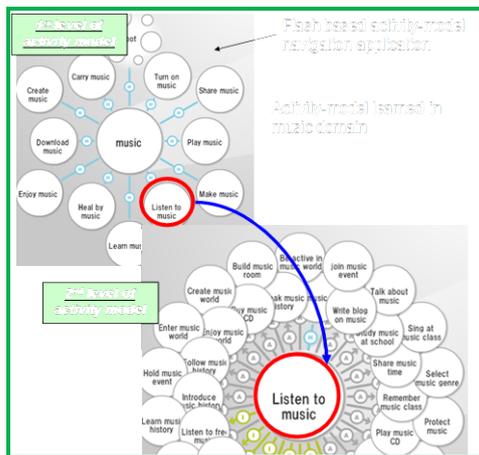


Fig.1 構築した行動モデルを用いた行動ナビ



Fig.2 地図ベースの動画視聴アプリケーション

References

- 1) Yusuke Fukazawa, Jun Ota: Automatic Modeling of User's Real World Activities from the Web for Semantic IR, 19th Int. World Wide Web Conference WWW2010, Semantic Search Workshop, 2010.
- 2) Yusuke Fukazawa, Jun Ota: Extraction of Hierarchical Relation between User's Activity based on Enhanced PMI-IR, JSAI 2010, 2010.
- 3) Yusuke Fukazawa, Jun Ota: User-centered Profile Representation for Recommendation on Multiple Content Domain, Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems, under review.
- 4) 深澤佑介、太田順：モバイル動画視聴のためのユーザ行動中心型地図インタフェース、電子情報通信学会 Web インテリジェンスとインタラクション研究会, pp. 45-49, 2009.