

平成21年5月27日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18680021

研究課題名（和文） 感覚と運動の統合によるダイナミックスキルの研究

研究課題名（英文） Research of Dynamic Skills Based on Sensory-Motor Integration

研究代表者

氏名（ローマ字）：並木 明夫（NAMIKI AKIO）

所属機関・部局・職：千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40376611

研究成果の概要：

多指ロボットハンドの操り能力を高速化することを目指して、視覚や触覚などの感覚情報を用いたフィードバック制御の導入と、動的な操り技能(ダイナミックスキル)の研究をおこなった。特に、(1)柔軟紐の片手結び、(2)ピンセットを用いた微小物体の操り、(3)対象を瞬時に持ち替えるダイナミックリグラスピング、(4)棒状の対象の移動と回転を動的に操作するタスクであるペン回し、の各タスクについて研究を行い、その技能を抽出するとともに、多指ロボットハンドを用いて実現した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2007年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
総計	21,000,000	6,300,000	27,300,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス、感覚行動システム、ダイナミックスキル、マニピュレーション、高速ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

近年、センサやアクチュエータ、コンピュータの処理能力の進歩に伴い、ロボットシステムの性能は大きく向上したが、人間の能力と比べるとまだ十分ではない。現状のロボットに欠けている点の一つは、対象や周囲の状況に合わせて素早く対応する「高速性」である。ここでいう「高速性」とは、単なる動作の速さだけではなく、環境の変化に対する反応速度も含んでいる。ロボットの速度を向上させるためには、アクチュエータやセンサなどのハードウェアを向上させるのと同時に、ロボットが身体を効率的に使用することでの高速化手法が求められていた。

これに対して、対象の加速度を制御して動的に対象を操作するダイナミックマニピュレーション

が提案されている。人間もこれを多用することで器用な動作を高速に実現している。例えば、「投げる」、「打つ」、「転がす」、「弾く」の動作が例として挙げられる。

ダイナミックマニピュレーションの利点の一つは、高速な作業が実現できることである。他にも、少ない自由度で複雑な作業を可能にする、操作能力に余裕を持たせ、予想外のエラーやトラブルに強いロバストなマニピュレーションを実現するなどの特長を持つ。さらに、ダイナミックな操作を利用することで、これまでには不可能で、人間でも困難なような新たなマニピュレーションスキルが生み出せる可能性がある。

## 2. 研究の目的

上記の背景に基づき、本研究の目的は、ロボットハンドの操りにおいてダイナミックマニピュレーションを体系化し、実機にて実現することである。特に、(1)ダイナミックマニピュレーションを、従来のセンサ入力のないフィードフォワード制御ではなく、センサフィードバック制御などの感覚運動統合を導入する、(2)単にダイナミックマニピュレーションを実現するだけではなく、それを利用することで従来では不可能であった新たなロボットスキル(ダイナミックスキル)を産み出す、の2点を目的とする。

## 3. 研究の方法

ダイナミックスキルの体系化・解析を行うにあたり、具体的な作業として、次の4つのタスクを対象とした。(1)動作中に動的に変形する柔軟紐の結び動作、(2)ピンセットによる微小物体の把持動作、(3)対象を瞬時、高速に持ち替えるタスクであるダイナミックリグラスピング、(4)棒状の対象の移動と回転を動的に操作するタスクであるペン回し動作。

## 4. 研究成果

### (1)柔軟紐の片手結びの研究

ダイナミックスキルの一例として柔軟紐の操りを扱った。柔軟紐の操りの難しさの本質的な点は、(a)操り動作中に紐自体が変形してしまうこと、(b)紐の動的パラメータを知るのが困難で、自由度が多いため紐の変形後の挙動が予測しづらいことなどが挙げられる。この問題の解決策として、(1)紐の動きを限定することで、予測困難な変形をキャンセルするような操り技術、(2)変形をリアルタイムで計測し、フィードバック制御する技術、等の方法が考えられる。特に本研究では、(1)に着目して柔軟紐の柔軟特性をキャンセルする操りスキルを提案し、(2)に対応してロバスト性を持たせるために視触覚フィードバック制御を適用する。

まず、人の片手結びを参考に、紐結び動作を3つのスキルに分割した。そのスキルとは、①輪の作成(図1(b))、②紐の入替(図1(c))、③紐の引抜(図1(d))である。

①の輪の作成の目的は、紐の端を掴んだ状態から、輪を作成し、紐の重なりを掴んだ状態を実現することである。ここでは、人間の結び動作を参考に、手首の旋回を利用する。紐の変形に対応してロバストに把持するために、高速ビジョンを用いた。

結び目を作るには、輪の中に紐を通す必要があるが、紐のダイナミクスや挙動が影響するために高速に実行することは困難である。そこで、等価な作業として、2つの指先を擦り合わせて紐の

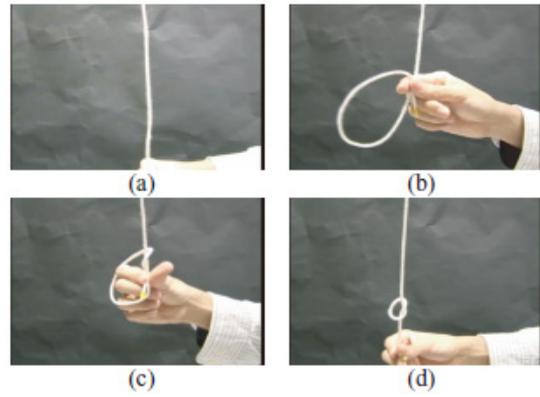


図1 人の片手結び

入替を行う。結び目を作るためには、擦り合わせにより、紐を2回入れ替える必要がある。また、紐が入替わる瞬間の両指の間隔を適切にするために、触覚による把持力制御を導入した。

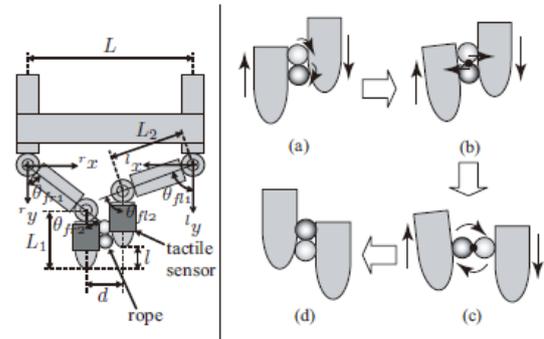


図2 紐の入替

図3に示すように、触覚センサと視覚センサを備えた3本指多指ハンドを用いて実験を行った。紐として、直径3.0mmの金剛打クレモナ製のものを用いた。

実験結果を図4に示す。(a)~(e)は輪の作成を、(g)~(i)は紐の入替を、(j)~(l)は紐の引抜を示している。また、(f)は紐の入替を行い易くするために紐を押さえ付ける動作を示している。成功率は約50%程度である。しかし、失敗の多くは紐の入替が1回だけで終わってしまうものであり、入替動作のやり直しを許せば、成功率は上がるものと考えられる。以上の結果より、提案した手法の有効性が示された。

また、本研究では、紐結びを、輪の作成、紐の入替、紐の引抜の3つのスキルによって実現できることを示したが、この手法は止め結び以外の結び目にも適用できることも解明された。現状では、8つの異なる結び目が実現できることが分かっている。

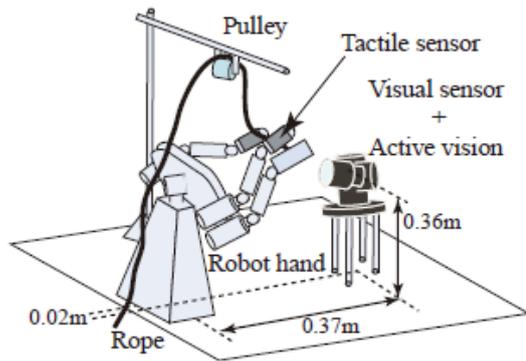


図3 実験システム

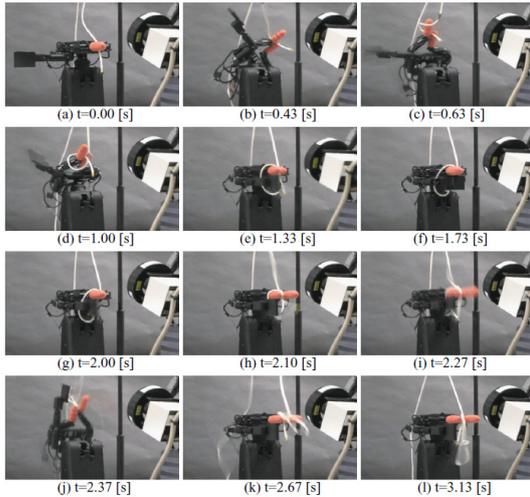


図4 実験結果

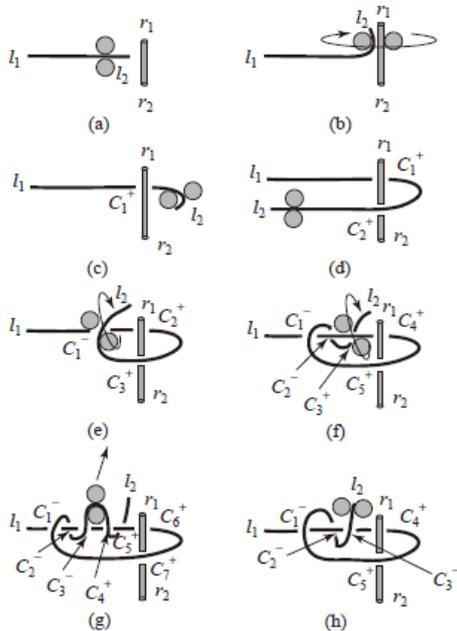


図5 ひと結びの戦略

## (2) 道具操りの研究

人間による器用な操り技術の代表例は道具の操りであり、道具を通して対象を操るという点で、単なる把持よりも難しいタスクである。道具操りの

技能をロボットハンドに実装することは、人間の器用さの理解、器用な操り能力を有するハンドの設計への応用という面で重要性が高い。

本研究では、道具としてピンセットを対象として研究を行った。図6に示すように、ハンドはピンセットを2本の指でつかみ、平面に置かれている対象を掴む。手、ピンセット、対象の位置姿勢はビジョンによって計測する。

ここで、システムをハンドと道具の間に受動関節を配置した多関節システムとみなし、把持力を制御して、指とピンセットの接点における摩擦力を利用することにより接点の状態を制御する。この受動関節を利用することにより、道具の先の可動範囲を広げる、道具の先が机などに衝突した時の衝撃を吸収するなどの効果がある。また、受動関節の変化はリアルタイムの視覚サーボ制御で補償する。

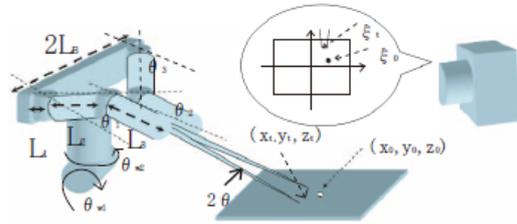


図6 ピンセットを用いた把持

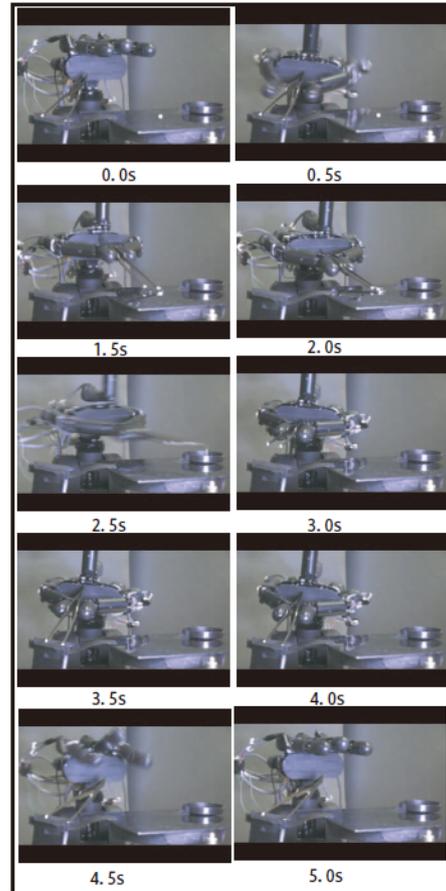


図7 実験結果

対象を米粒として把持実験を行った。3指ハンドを 500Hz のサンプリングレートの高速ビジョンで制御した。実験結果を図 7 に示す。0.0～0.5s でピンセットを把持し、0.5～2.0s で対象を把持している。その際に、ピンセットの先が机表面に接触しているが、ピンセットを柔らかく把持することで、面上をなぞらせることに成功している。2.0～2.5s で対象の米粒を皿に落とし、2.5～4.5s でピンセットを元の台に戻している。このように視覚サーボと受動関節を利用することで、高速かつ柔軟なピンセット操り動作を実現した。

### (3)ダイナミックリグラスピングの研究

ダイナミックリグラスピングとは、対象に瞬間的に投げ上げて任意の回転運動を与えてから、再度キャッチすることで対象の持ち替えを行う手法である。本研究では、これまでの軸対象物体だけではなく、軸非対称物体についても研究を進め、目的の姿勢に投げ落とすための投擲方法について理論的な解析を行った。

### (4)動的ペン回しの安定性の研究

ペン回しにおける回転運動について解析を行い、回転運動の安定性について解析した。また、その解析をもとに、これまでに提案したペン回し制御アルゴリズムの妥当性について議論し、制御アルゴリズムの改良を行った。

## 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. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 高速多指ハンドと高速視触覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び操作, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.8, 2009 (掲載予定)
2. 妹尾 拓, 並木 明夫, 石川 正俊: 高速打撃動作における多関節マニピュレータのハイブリッド軌道生成, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.4, pp.515-522, 2006.

### [学会発表](計 31 件)

1. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 多指ハンドの動作を考慮したスキル統合に基づく結び操作, 第 14 回ロボティクスシンポジウム (登別, 2009.3.17) / 予稿集, pp.331-336
2. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 多指ハンドによる結び操作実現を目指したスキル統合, 第 9 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 (SI2008) (岐阜, 2008.12.5) / 講演会論文集, pp.329-330

3. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 高速多指ハンドシステムを用いた線状柔軟物体の結び操作, 豊橋技術科学大学 GCOE シンポジウム(ADIST2008) (豊橋, 2008.10.17) / 抄録集, p.64
4. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: スキル統合に基づく結び操作と多指ハンドによる実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008(ROBOMECH 2008) (長野, 2008.6.6) / 予稿集, 1P1-A09
5. 水澤悟, 並木明夫, 石川正俊: 高速多指ハンドによる高速視覚サーボを用いたピンセット型道具操り, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008(ROBOMECH 2008) (長野, 2008.6.6) / 予稿集, 1P1-A13
6. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 多指ハンドと視触覚フィードバックによる柔軟紐の高速マニピュレーション, 第 13 回ロボティクスシンポジウム (香川, 2008.3.17) / 予稿集, pp. 529-534
7. 並木明夫, 石原達也, 山川雄司, 石川正俊, 下条誠: 高速多指ハンドを用いた棒状物体の回転制御, 第 13 回ロボティクスシンポジウム (香川, 2008.3.17) / 予稿集, pp.541-546
8. 森川翔, 並木明夫, 石川正俊: 画像モーメント情報を利用した棒状物体の回避行動, 第 8 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 (SI2007) (広島, 2007.12.20) / 講演会論文集, pp.51-52
9. 水澤悟, 並木明夫, 石川正俊: 高速視覚を用いた多指ハンドによる道具の操り, 第 8 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 (SI2007) (広島, 2007.12.20) / 講演会論文集, pp.55-56
10. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 高速視触覚フィードバックを用いた多指ハンドによる柔軟紐の操り, 第 8 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 (SI2007) (広島, 2007.12.20) / 講演会論文集, pp.59-60
11. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 触覚フィードバックを用いた柔軟紐の高速片手結び, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007(ROBOMECH 2007) (秋田, 2007.5.12) / 講演論文集, 2A1-E08
12. 古川徳厚, 並木明夫, 妹尾拓, 石川正俊: ビジュアルフィードバックに基づく高速多指ハンドを用いたダイナミックリグラスピング, 第 12 回ロボティクスシンポジウム (長岡, 2007.3.15) / 講演論文集, pp.144-149
13. 並木明夫: 高速マニピュレーションプロジェクト, 第 7 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(SI2006) (札幌, 2006.12.15) / 講演会論文集, pp.722-723
14. 古川徳厚, 妹尾拓, 並木明夫, 石川正俊: 未知な動的パラメーターの学習と高速視覚を用いたダイナミックリグラスピング, 第7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(SI2006) (札幌, 2006.12.15) / 講演会論文集, pp.724-725
  15. 石原達也, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 高速多指ハンドによるペン状物体の回転制御, 第7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(SI2006) (札幌, 2006.12.15) / 講演会論文集, pp.726-727
  16. 森川翔, 並木明夫, 石川正俊: 高速ビジュアルサーボによる実時間障害物回避行動, 第7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(SI2006) (札幌, 2006.12.15) / 講演会論文集, pp.728-729
  17. 大薄隆志, 並木明夫, 石川正俊: 多関節マニピュレータによる低衝撃捕球動作, 第7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(SI2006) (札幌, 2006.12.15) / 講演会論文集, pp.738-739
  18. 荻野俊明, 並木明夫, 石川正俊: 高速視覚による多指ハンドのテレマニピュレーション, 第7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(SI2006) (札幌, 2006.12.15) / 講演会論文集, pp.740-741
  19. 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 高速多指ハンドを用いた柔軟紐の片手結び, 第7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(SI2006) (札幌, 2006.12.15) / 講演会論文集, pp.744-745
  20. 森川翔, 並木明夫, 石川正俊: 小型軽量高速ビジョンを搭載したロボットマニピュレータによる実時間障害物回避行動, 第24回日本ロボット学会学術講演会(岡山, 2006.9.15) / 予稿集, 2B18
  21. 古川徳厚, 妹尾拓, 並木明夫, 石川正俊: ダイナミックリグラスピングにおける把持戦略, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06(ROBOMECS 2006) (東京, 2006.5.27) / 講演論文集, 1A1-B34
  22. 石原達也, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: 高速触覚システムを用いたペン状物体の高速把持・操り, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 (ROBOMECS 2006) (東京, 2006.5.27) / 講演論文集, 1A1-B39
  23. 並木明夫, 石川正俊, 加藤真一, 金山尚樹, 小山順二: 高速キャッチングロボットシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006(ROBOMECS 2006) (東京, 2006.5.27) / 講演論文集, 1A1-E27
  24. Yuji Yamakawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Shimojo: Knotting Manipulation of a Flexible Rope by a Multifingered Hand System based on Skill Synthesis, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Nice, 2008.9.24) / Proceedings, pp.2691-2696
  25. Satoru Mizusawa, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa: Tweezers Type Tool Manipulation by a Multifingered Hand Using a High-Speed Visual Servoing, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Nice, 2008.9.24) / Proceedings, pp.2709-2714
  26. Akio Namiki, Yuji Yamakawa, and Masatoshi Ishikawa: Sensory-motor Integration for Dexterous High-speed Handling, International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology 2008(SICE Annual Conference 2008) (Tokyo, 2008.8.22) / Proceedings, pp.3376-3379
  27. Yuji Yamakawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Shimojo: One-handed Knotting of a Flexible Rope with a High-speed Multifingered Hand having Tactile Sensors, 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (San Diego, 2007.10.30) / Proceedings, pp.703-708
  28. Sho Morikawa, Taku Senoo, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa: Realtime collision avoidance using a robot manipulator with light-weight small high-speed vision systems, 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA'07) (Roma, 2007.4.11) / Proceedings, pp.794-799
  29. Akio Namiki, Taku Senoo, Noriatsu Furukawa, and Masatoshi Ishikawa: Visuomotor Integration in High-speed Manipulation System, SICE-ICASE International Joint Conference 2006 (Busan, 2006.10.2) / Proceedings, pp.4192-4197
  30. Tatsuya Ishihara, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Shimojo: Dynamic Pen Spinning Using a High-speed Multifingered Hand with High-speed Tactile Sensor, 2006 IEEE RAS International Conference on Humanoid

Robots (HUMANOIDS'06) (Genoa, 2006.12.5)/Proceedings, pp.258-263

31. Noriatsu Furukawa, Akio Namiki, Taku Senoo, and Masatoshi Ishikawa: Dynamic Regrasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006) (Orlando, 2006.5.16)/pp.181-187

[その他]

ホームページ等

<http://mec2.tn.chiba-u.jp/~namiki/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

並木 明夫 (NAMIKI AKIO)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40376611