

視覚情報の予測に基づいて運動情報の推定を行う神経回路モデル

伊藤 寛¹ 福村 直博^{1,2} 宇野 洋二^{1,2}
 Hiroshi Ito Naohiro Fukumura Yoji Uno

1. はじめに

ヒトは運動前に知覚される感覚情報から運動情報への変換を適切に行うことで滑らかな運動を実現する。しかし、この変換は解が一意的でない不良設定問題であり、解くことが困難である。例えば、転がって来るボールをある方向に蹴ろうとした場合、そのための脚の運動はボールの軌道上で様々に考えられる。そこでヒトは、運動を繰り返したときに得られる感覚と運動の情報を統合する学習により、運動に必要な情報を抽出する座標変換を獲得し、その情報に基づいて感覚運動変換を行っていると考えられている。この情報は内部表現と呼ばれ、福村ら [1] や若城ら [2] は砂時計モデルを利用し、学習により獲得した内部表現に基づいて視覚情報から把持対象物を把持するための手形状や、障害物を乗り越えるための姿勢を推定するモデルを提案した。しかし、これらは対象とする情報を静的なものに限っていた。そこで、本研究では感覚情報や運動情報の時系列から内部表現を獲得し、感覚運動変換を行う神経回路モデルを提案する。そして、計算機シミュレーションによりモデルの有効性を検証する。

2. 感覚運動変換タスク

本研究では『転がって来るボールを狙った方向に蹴る』というタスクを考える。このタスクでは、転がって来るボールを視覚情報の時系列として知覚し、ボールを蹴ったときの脚の姿勢情報を運動情報として得る。そして、ボールの転がった方向に首を動かすことで、その姿勢から運動の結果を得るとした。このタスクは、蹴るときのボールと足先の位置が一致し、そして狙った方向にボールが転がるという拘束条件を満足し、その中でなんらかの最適化条件を満たす脚の姿勢情報とタイミングを推定する拘束条件つき最適化問題とみなすことができる。

我々は以前、内部表現に基づいて感覚運動変換を行うモデルを提案し、同様のタスクに適用した [3]。モデルは、タスク中に得られる情報を統合する学習により、内部表現として転がって来るボールとそれを蹴る足先の位置と速度に関する情報を獲得した。その後、視覚情報の時系列から内部表現の計算を介して幾つかの運動情報の候補を推定した。しかしこのモデルでは、一意に適した運動情報を決定するには多くの計算が必要だった。

3. モデルの構成

本研究では、先のモデルを図1の様に変更した。モデルは [3] と同様にタスク中に得られる情報に対応したモジュール構成になっている。視覚情報を扱うネットワーク (図1の右下) では入

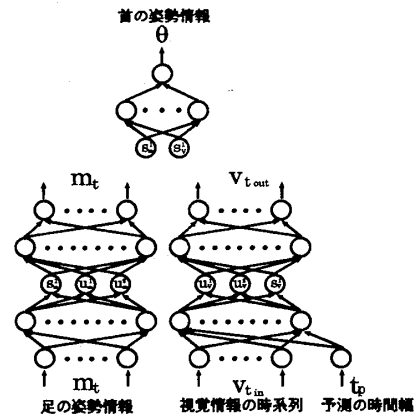


図1: 感覚情報の時系列と運動情報を統合する神経回路モデル

力された視覚情報から任意のステップ後に知覚される視覚情報の予測を学習する。そのため何ステップ後を予測するのかを表す t_p を入力層に追加した。このニューロンの値を調節することで適切なボールを蹴るタイミングを決定できると考えられる。脚の姿勢情報やタスクの結果を扱うネットワーク (図1の左下, 上) では [3] と同様に、ボールを蹴るときの脚の姿勢情報を入力とした恒等写像や、 s_v^1, s_m^1 で示したニューロンの出力からタスクの結果の予測を学習する。また、 m_t と $v_{t,out}$ が共にボールを蹴るタイミングに得られた情報であるとき、若城ら [2] と同様にお互いのネットワークの中間層の2つのニューロンが同じ値になるように拘束条件 ($u_v^1 = u_m^1, u_v^2 = u_m^2$) を加えて学習した。これらのニューロンには m_t と $v_{t,out}$ が共有している、位置に関する情報が内部表現として獲得されると期待できる。 s_v^1, s_m^1 には、その出力からタスクの結果を予測することにより、速度に関する情報が内部表現として獲得されると期待できる。提案モデルでは、学習後の内部表現からネットワークを前向きに計算することで脚の姿勢情報が計算される。従って、知覚された視覚情報から内部表現 u_m^1, u_m^2, s_m^1 と t_p の適切な値を計算することが出来れば、タスクを達成することが可能になる。さらに、脚の姿勢情報の代わりに運動に必要な情報を表している内部表現の値を推定することで計算量を少なくすることが期待できる。

4. 学習による内部表現の獲得

タスク中に得られる情報を統合する学習により内部表現が獲得できることを、計算機シミュレーションにより確認する。学習データは [3] と同様に図2(a)に示したA,B,C,Dの4箇所に4方向から向かって来るボールの軌道と、その4箇所に来たボールを蹴るための4方向の足先を振り出す方向を使用した。ボールの軌道を5ステップ用意し、それに合わせて t_p は4段階用意し

¹ 豊橋技術科学大学 情報工学系

² 豊橋技術科学大学 インテリジェントセンシングシステム
 リサーチセンター

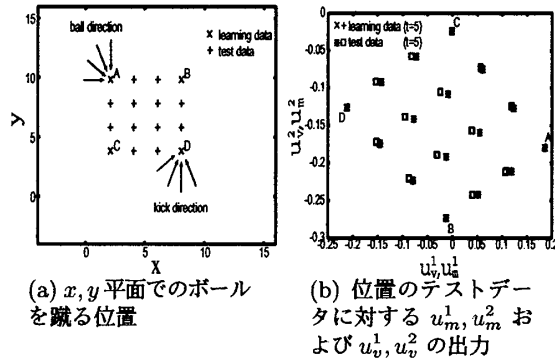


図 2: 位置に関する内部表現を獲得するニューロンの出力

た。そして、入出力における t_{in}, t_p, t_{out} の可能な全ての組み合わせを用いて BP 則で十分学習を行った。学習率は学習が最も早く収束する値として 0.001 に設定した。

学習が十分に収束した後、内部表現を確認するために学習データとボールを蹴る位置、ボールの軌道、脚を振り出す方向を数パターン追加したテストデータに対する $u_v^1, u_v^2, u_m^1, u_m^2$ の出力を調べた。図 2(b) にそれらの出力を示す。図中の A, B, C, D は図 2(a) において同じ記号が記してある位置に対する出力を示している。 \mathbf{m}_t と $\mathbf{v}_{t_{out}}$ が位置に関する情報を共有しているとき値はほぼ一致し、相対的な位置関係が保存されていることが分かる。この結果から、これらのニューロンには位置に関する情報が同じ座標系で獲得されている事が分かる。また、 s_v^1, s_m^1 の出力はボールや足先の速度に対して単調に変化しており、速度に関する情報が獲得された。以上の結果から、提案モデルでは学習により内部表現を計算するための座標変換が獲得されたことが確認された。

5. 脚の姿勢情報とタイミングの推定

内部表現を利用することで、知覚した視覚情報から適切な脚の姿勢情報とタイミングを推定できることを計算機シミュレーションにより確認する。この推定は、知覚した視覚情報から計算した内部表現 u_v^1, u_v^2, s_v^1 に基づいて脚の姿勢情報に関する内部表現 u_m^1, u_m^2, s_m^1 と t_p の適切な値を求める拘束条件つき最適化問題である。このとき、位置に関する内部表現 u_m^1, u_m^2 と u_v^1, u_v^2 が常に同じ値を取るとすることにより、ボールと足先の位置が一致するというタスクの拘束条件が常に満たされる。従って、推定のためのエネルギー関数 J は、式 (1) の様に記述できる。第 1 項はボールが狙った方向 $\hat{\theta}$ に転がるという拘束条件、第 2 項は最適化条件を表している。今回は最適化条件として、適当な脚の姿勢 $\hat{\mathbf{m}}$ を基準とし、脚の姿勢がそれに近いほど最適であるとした。ただし、この最適化条件には脚の速度に関する情報は考慮していない。

$$J = \frac{1}{2}(\hat{\theta} - \theta)^2 + \eta \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{m}} - \mathbf{m}_t)^2 \quad (1)$$

脚の姿勢情報に関する内部表現のうち u_m^1, u_m^2 の値は視覚情報から計算される u_v^1, u_v^2 の値から常に一意に決まる。従って、脚の姿勢情報とタイミングは J を最小にする s_m^1 と t_p の値を推定

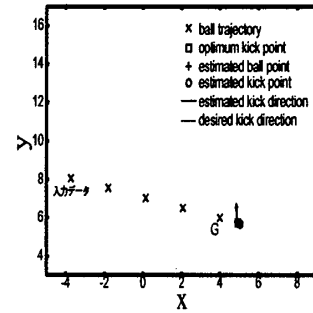


図 3: 知覚した視覚情報から運動情報の推定を行った結果

することで求められる。今回は、拘束条件は s_m^1 に、最適化条件は t_p にそれぞれ依存するものである。そのため推定は、最急降下法で J の各項を最小にすることで求められ、 η の値によらない。また、最急降下法の更新率は推定にほとんど影響がなかった。

推定を行った結果を図 3 に示す。推定は、テストデータとして用意したボールの軌道の 1 ステップ目の視覚情報を入力とし、モデルの学習時に設定していない方向を目標として行った。図には推定を行ったボールの軌道、推定された足先の位置とそのタイミングにボールのある位置、推定結果の理論値、さらに蹴ったボールの転がる方向と狙った方向が示してある。推定された足先の位置がボールの軌道上にあり、理論値やボールの位置と非常に近いことが分かる。蹴ったボールの転がる方向については目標と良く一致しているため重なって 1 つの矢印しか見えない。この結果から、提案モデルにより内部表現に基づいた運動情報の推定が可能であることが確認された。

6. おわりに

今回行った計算機シミュレーションでは、提案モデルが学習により内部表現を計算するための座標変換を獲得し、それを利用することで感覚情報から運動情報への変換が可能であることを示した。現在は入力として t_p を外部から与えているが、これに相当する情報を視覚情報と運動情報で内部表現として計算できれば、ボールを蹴るタイミングだけでなく脚を振り出すタイミングについても推定が可能になると期待できる。また提案モデルは、感覚情報や運動情報を統合することで、一方の情報のみからは計算することが難しい情報を内部表現として獲得している。このことから情報統合の有用性が示唆された。

参考文献

- [1] 福村直博, 宇野洋二, 鈴木良次, 川人光男. 対象物の形状に合わせて手の形を決定する神経回路モデル. システム制御情報学会論文誌, Vol.8, No.8, pp.408-417, 1995.
- [2] 若城圭太郎, 福村直博, 宇野洋二. 感覚運動統合による 4 脚ロボットの障害物認識・行動選択モデル. 信学技報.NC2002-178(2003-03).
- [3] 伊藤 寛, 福村 直博, 宇野洋二. 感覚運動統合によりタスクに必要な情報を分離抽出する神経回路モデル. 信学技報.NC2004-106(2004-11)