

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目	不確実環境下における打撃動作の知覚－運動制御メカニズムの解明
氏 名	高御堂 良太

論 文 内 容 の 要 旨

従来の運動制御・学習研究においては、ヒトの身体運動を計算論的、情報処理論的な観点から理解しようとする試みが主流であった。このような観点からの研究では、私達ヒトの感覚器官、中枢神経系、筋骨格系をそれぞれ、センサー、CPU（コントローラ）、アクチュエータとして置き換えて、身体運動を実行するメカニズムの解明に取り組んできた。

しかしながら、このような計算論的な観点から私達ヒトの身体運動を理解しようとする場合には、身体運動の実行に伴う不確実性(uncertainty)にどのように対処するかという問題が生じることになる。身体運動における不確実性としては、まず、周囲の環境に関する情報が不足し、運動を実行する際にこれらがどのような状態であるかを、一意に決定（予測）することが困難なこと、すなわち外部事象の不確実性が挙げられる。またさらに、身体関節の冗長性(redundancy)から行う身体運動を一意に決定するのが困難であること、筋の力発揮の大きさに伴うノイズ(signal-dependent noise)の影響から、想定通りの身体運動を実現することが困難であること等、私達ヒトの身体に由来する、身体内部の不確実性が挙げられる。本論文ではこの外部事象の不確実性と身体内部の不確実性を合わせて、不確実環境として定義する。このような不確実環境への対処という問題点から、産業ロボットの開発等、応用的な研究領域では、歩行等の比較的単純な運動課題に関しても、私達ヒトの身体運動を正確に再現することが出来ていないのが現状である。

このような背景から、本論文では不確実環境下におけるヒトの知覚－運動制御メカニズムを解明することを目的として研究を行う。具体的には、私達ヒトが行う様々な身体運動の中でも、特に不確実な環境下で実行される、野球型競技の打撃動作を題材として、不確実環境下における打撃動作の知覚－運動制御メカニズムの解明に取り組む。

野球型競技の打撃動作において、打者は投手のボールリリースから約 0.5 秒という非常に短い時間内で飛来するボールに対して、この限られた時間のうちにその到達位置や到達時点を把握し、打撃動作を実行しなければいけない。これはすなわち、投げられるボールに関する情報が不足した、外部事象の不確実性が大きな状態での身体運動を要求されていることを意味している。また、打撃動作は全身の冗長な自由度を協応させて、かつ最大限の筋出力を要求され、身体内部の不確実性も大きい状態での身体運動であるといえる。そのため、野球型競技の打撃動作を題材として、熟練の打者がこのような不確実性に対して、どのようにして対処しているかを明らかにすることは、不確実環境下における私達ヒトの知覚-運動制御メカニズムの解明に繋がる。

本論文では不確実環境下において適切な身体運動を実行するための対処方法として、事前情報(advanced information)に基づく予測の利用と身体内外の制約(課題の制約)による運動パターンの生成という二つの方法を仮定し、野球型競技の打撃動作を題材としてこれらの検証を行った。これらの対処方法のうち、前者は運動の対象となる出来事が生じる以前に予測を行うことで、外部事象の不確実性を減少させることに相当する。また後者は、ルールや使用する道具等の外的な制約や、運動を行う際の目的等の内的な制約によって、身体内部の不確実性を減少させ、無数の候補の中から適切な運動パターンを選定することに相当する。

具体的な本論文の取り組みとしては、前述の二つの対処方法に関する考察を基にして、大別して二つの研究課題に取り組む。一つ目の研究課題では、打者が投手の投球動作という事前情報(事前運動情報)を利用して、外部事象や身体内部の不確実性を減少させるメカニズムや、それによって生成される運動パターンを実験的に明らかにする。この研究課題では、投手の投球動作速度という事前運動情報に着目をして、投球映像の中でこれを実験的に操作した際に、打者の球速予測や球速知覚、打撃動作に及ぼす影響を検証した。また、二つ目の研究課題では、実際の競技場面における外部事象と身体内部の不確実性に対して、打者に課せられる課題の制約に応じた対処法(運動パターン)を観察的研究によって明らかにする。この研究課題では、競技場面における時間的な制約とインパクトの制約という二つの制約に着目をして、この制約が異なる競技レベル間での運動パターンの比較を行った。

これらの研究課題の結果、まず、一つ目の研究課題では、投手の投球動作速度が速く(遅く)なるほど、打者はより速い(遅い)球速を予測し、またこの予測の影響(予測バイアス)を受けて、実際には同じボール速度であっても、打者はより速い(遅い)球速を知覚する傾向にあり、インパクトのタイミングも早く(遅く)なる傾向にあった。この結果は、神経科学領域における情報統合(ベイズ統合)の理論との関連が示唆され、打者はボールがいつ、どこに到達するかを正確に把握することが困難な不確実環境においては、投げられたボールに関する情報(感覚入力)

のみを用いて打撃を行うのではなく、投手の投球動作という事前運動情報に基づく予測を利用して、投じられたボールの知覚やそれに対する打撃動作を行っていることが明らかになった。すなわち、打者は不確かなボール情報を事前予測によって補うことで、不確実環境においても、適切な打撃動作を実現していることが明らかになった。

またさらに、上記の実験を実施する際に計測した行動データを基に、キネマティクス（運動学）やキネティクス（運動力学）の観点から動作分析を行った結果、投手の投球動作速度の違いに対応して、打者は明確に異なる運動パターンを生成していることが明らかになった。具体的には、投手の投球動作速度が速い（遅い）ほど、打者は体重移動やテイクバック等の投手に対する準備動作が小さく（大きく）なり、また投じられたボールに対するスイング動作（主動作）では、表面上の動き（キネマティクス）には明確な影響が見られなかったものの、両脚の地面反力には顕著な違いが観察され、下肢を用いた調節を行っていることが明らかになった。これらの結果はまた、先行する準備動作（体重移動）を比較的粗雑な調節と、後続のスイング動作の精緻な調節という、打撃動作における段階的な知覚-運動制御メカニズムを示唆していた。これによって、打者はボールの到達位置やタイミングが不確実な環境下においても、投球動作を基にした準備動作によって大きな運動エネルギー（体重移動の速度等）を得ながら、投じられたボールを基にしたスイング動作の微細な調節によって、正確なインパクトの位置やタイミングを実現していることが本論文の結果から明らかになった。

また、二つ目の研究課題の結果からは、投手の平均的なボール速度を表す時間的な制約と、インパクト時に要求されるスイング速度（筋出力）を表すインパクトの制約という二つの課題の制約によって、野球型競技の打者は競技レベル間で異なる準備動作パターンを生成していることが明らかになった。具体的には、打者が投手に対して準備動作を開始するタイミング（始動時間）とその準備動作を継続した時間（ステップ時間）という二つの特徴量を仮定し、この二変数に対して階層クラスター分析を適用することで、打者毎の準備動作パターンを分類した。これによって打者が行う準備動作は三つのパターン（EL(early initiation - long duration)タイプ、LS(late initiation-short duration)タイプ、ES(early initiation -short duration)タイプ)に分類され、上述の二つの課題の制約の違いに応じた、競技レベル間での動作パターンの複雑な変化が明らかになった。

すなわち、時間的な制約が大きくなるほど、投手に対して準備動作を開始するタイミングが早くなり、ES、ELタイプ等の早期の始動を伴う準備動作パターンが生じることが示唆され、インパクトの制約が大きくなるほど、準備動作の時間が長くなり、より大きな準備動作を伴うELタイプの準備動作パターンが生じやすくなることが示唆された。これらの結果は、私達ヒトが課題の制約に応じて、自らの冗長

な自由度を制御した（身体内部の不確実性を減少させた）運動パターンを生成していることを示している。

またさらに、実際の競技成績との比較から、これらの動作パターン間では競技成績も異なり、ES タイプは他のタイプに比べて単打傾向にある（長打よりも単打を多く打つ傾向にある）ことが明らかになった。このことは、時間的な制約やインパクトの制約といった外的な制約が同一の環境であっても、目的や意図（長打志向と単打志向等）等の内的な制約によって個々の行う準備動作パターンに個人差が生じることを示唆している。そのため、私達ヒトの個性豊かな身体運動は、個々が身体内外の様々な制約に応じて、身体内部の不確実性を減少させることで創発されていることが示された。

これらの本論文の二つの研究課題の結果に共通していることとして、運動の対象となる出来事（ボールの飛来等）が生じる以前に、先行して行われる予測や準備動作の重要性が挙げられる。すなわち本論文の結果は、私達ヒトが不確実な環境下における身体運動を実現するためには、実際に生じた出来事に対する知覚や主動作よりもむしろ、それ以前の事前情報を基にした予測や準備動作等が重要であることを示唆している。すなわち、不確実な環境下において生じた出来事に対する知覚や主動作をより適切なものにするためには、段階的な知覚－運動制御において主動作に先行する予測や準備動作等を適切に行うことが重要であることを示唆している。

本論文の結論として、本論文で観察されたこのような打撃動作における知覚－運動制御メカニズムは、外部事象や身体内部の不確実性が含まれる不確実環境であるからこそ、観察されたものであると考える。すなわち、将来が不確かであるということは、より以前の時点からの予測や準備動作を行って、それに備えることを促し、また、冗長な身体自由度は個々がどのような基準（制約）によって、これを制御するかの違いを生み、個性的な運動パターンを顕在化させる。そのため、「複雑さ」や「冗長性」、そして「不確実性」といった、計算論的な観点からの理解を困難にする要因こそが、私達ヒトの機械とは異なる、不確実な環境下における柔軟で個性的な知覚－運動制御、すなわち「ヒトらしい」身体運動の形成に重要な役割を果たしていることが本論文の結果から示された。