

論文内容の要旨

論文題目 : Biomechanics and Motor Control of Multidirectional Locomotion in Humans

(ヒトの多方向移動動作における運動制御及びバイオメカニクス研究)

氏名 : 稲葉優希

第1章 : 序論

ヒトの身体は、重心が狭い支持基底面に対して高い位置に存在するため、力学的に不安定である。したがって、ヒトが移動動作を遂行する際には、そのように不安定な構造をしている身体を緻密に制御し、全身を協調させて動作を行わなければならない。移動動作は常に前方に遂行されるわけではなく、目的に応じて横や斜め方向にも行われる。前方への移動と比較して、横や斜め方向への移動は矢状面以外での動作が大きくなり、力学的により不安定な動作であるといえるが、ヒトはそれらの動作を通常問題なく行うことができる。

前方以外の方向への移動は、日常生活だけでなくスポーツ場面においても頻繁にみられる。たとえば、バスケットボールやサッカーなどのスポーツにおいて、横や斜め方向に素早く移動する能力は、勝敗を左右し得る重要な要因である。しかし、ヒトの横や斜め方向への移動動作がどのように制御され、全身がどのように協調することにより成り立っているかについては明らかになっていない点が多い。そこで、本博士論文では、ヒトの多方向移動動作、主に横や斜め方向への移動動作において全身がどのように制御され、協調しているかを明らかにすることを目的とした。身体運動は、筋が中枢神経系で生成された運動指令に従い力を発揮した結果である。したがって、最終的に行われた運動を測定し、定量することによって、運動制御方略を明らかにできると考えられる。そこで、本博士論文では結果として出力された動作、特に多方向移動動作を運動学的及び力学的に定量化することによって、全身の協調方略及び運動制御方略を検討した。多方向移動動作は、移動方向の制御及びスピード・距離の制御という二つの観点から捉えることができる。本博士論文の第2、第3章では移動方向の調節メカニズムを、第4章では目的方向への推進力獲得のメカニズムを明らかにし、第5章において総括論議を行った。

第 2 章：多方向移動動作における予測的姿勢調節

主動作が実際に行われる以前に筋活動や足圧中心（COP）位置を調節することは予測的姿勢調節(Anticipatory Postural Adjustment: APA) と呼ばれ、主動作を遂行することによって起きる外乱を最小限に抑える役割を果たす。前方への歩行開始や前方への踏み出し動作においても、転倒せずにスムーズに身体重心（COM）を前方へ加速するために、踏み出し動作で先行する足の踵が離地するまでに APA が行われると言われている（Breniere and Do, 1991）。APA は動作の非常に早い段階で行われる調節であり、運動プログラムを反映すると言われている（Crenna and Frigo, 1991）。そこで、多方向移動動作においても APA によって移動方向の調節が行われる可能性があると考え、第 2 章では APA を観察することにより多方向移動動作における移動方向調節方略を明らかにすることを目的とした。被験者に静止立位状態から 2 つのスピード条件（①自然なスピード②できる限り速く）で前方・斜め 3 方向・横方向の計 5 方向への踏み出し動作を行わせ、APA 期（動作開始から先行する足の踵が離地するまで）の筋活動、関節モーメント及び COP の軌跡を解析した。前方へ移動する際には、APA 期において立位姿勢を維持するために活動していたヒラメ筋の活動が減少する局面が現れ、前脛骨筋の活動が増大する。一方、横方向へ移動する際には、APA 期においてヒラメ筋の活動を継続させて、更に前脛骨筋の活動を減少させることにより、COP の後方移動量を減少させていた。また、前方への移動動作において、COP は先行する足側へ一旦移動することが示されていたが、横方向へ移動する場合には先行する足側への COP の移動も消滅した。このように、APA 期という動作の非常に早い段階において COP 移動方向を変化させることにより、COP と COM の間に生じるずれの方向と大きさを調節することにより、COM を目的とする方向へ加速させていることが明らかとなった。

第 3 章：倒立振り子モデルを用いた移動方向調節機序の検討

第 3 章では、第 2 章で観察された APA 期の移動方向調節が、動作全体（動作開始から支持脚が離地するまで）における移動方向の決定に対してどの程度の影響を及ぼしているかを検討するために、単セグメントの倒立振り子モデルによる COM 移動軌跡の予測を行った。このモデルには第 2 章で定義された APA 期終了時点での COM の位置と速度を初期条件として与え、それ以降の COM の軌跡は 4 次のルンゲクッタ法を用いて予測した。この倒立振り子モデルには、APA 期以降の積極的な筋活動による移動方向調節は反映されない。それにも関わらずこの非常に単純な倒立振り子モデルによって踏み出し動作遂行中の水平面上の COM 軌跡を予測することが出来た。これは特に、動作を速く行うように指示した場合に顕著であり、素早く横・斜め方向へ踏み出す動作においては、APA 期という非常に早い段階で移動方向を決定するための積極的な制御がほぼ終了していることが明らかとなった。それらの動作においては、APA 期以降には追加の移動方向調節はほとんど行われず、身体は APA 期以降、重力の影響により振り子が倒れる方向に加速されていることが分かった。

また、速くステップする条件においては蹴り足において積極的な床への力発揮を行っているにも関わらず、倒立振り子モデルが実際の COM 軌跡を予測できたことから、APA 期以降に重力の影響により COM が加速される方向と一致した方向への力発揮が行われることが明らかとなった。

第 4 章：横方向への推進力獲得メカニズムの解明

第 4 章では、前方以外の方向への移動動作における推進力獲得メカニズムを検討した。前方以外への動作の代表として横方向への移動動作を扱った。横方向への移動動作においては、前方への移動動作と比較して前額面上の動き、特に股関節外転動作が大きくなる。しかし、下肢のどの関節のどの軸周りの関節モーメントが横方向への推進力の獲得に貢献しているかは不明であった。そこで、意図的に推進力を大きくしなければならない状態、つまり移動距離を増大させたときに下肢各関節の 3 次元関節モーメントがどのように変化するかを観察することによって、各関節モーメントの推進力獲得への貢献を検討した。その結果、まず、股・膝・足関節の屈曲・伸展動作及び股関節外転動作は移動距離の増大に伴い増加することが確認された。その際、各関節の伸展（底屈）モーメント及びその仕事は距離の増大に伴い増加したが、股関節外転モーメント及びその仕事の増加率は伸展の仕事と比較すると低かった。したがって、横方向への移動動作では、動作としては股関節外転が特徴的に大きくなるが、関節モーメント及び仕事量を観察すると、横方向への推進力獲得に貢献しているのは各関節の伸展モーメント及びその仕事であることが明らかになった。

股関節外転の仕事は推進力獲得に直接は貢献していないと考えられたが、動作初期に股関節外転モーメント及びその仕事の発揮がみられた。動作全体を COM が下方へ移動していく反動動作局面と、COM が最下点に達してから蹴り足が離地するまでのプッシュオフ局面に分けて観察すると、反動動作局面終了時点での COM 位置が移動距離によって異なることが観察された。以上の結果より、反動動作局面においては股関節外転の仕事を行うことにより、COM が最下点に達するまでに移動距離に応じた姿勢調節を行い、プッシュオフ局面においては主に伸展の仕事により推進力を獲得することによって横方向への移動動作が遂行されることが明らかとなった。

第 5 章：総括論議

以上の結果をまとめると、ヒトは様々な方向へ移動する際、移動方向の調節を動作の非常に早い段階（APA 期）に終了させており、APA による調節だけでは獲得できない推進力は下肢各関節の伸展モーメント発揮によって獲得していることが明らかとなった。前方への歩行動作においても、重力に抗して常に筋を緻密に活動させて、力学的に不安定な身体を支持しなければヒトは転倒してしまう。しかし、ヒトは重力を利用して身体を加速させているともいえる。運動方程式からも、関節の角加速度が筋トルクだけでなく重力トルク

からも生成されることがわかる。たとえば、歩行においては、位置エネルギーと運動エネルギーの変換を繰り返すことによって前方へ推進するため、少ない筋活動で推進することができる(Cavagna et al., 1963)。本研究のような多方向踏み出し動作においても、動作の早い段階の COP と COM の間のずれが少ない局面では積極的に筋活動を調節して COP と COM の間に意図的にずれを生じさせるが、その後、重力の影響による COM の加速が大きくなる局面では、積極的な移動方向の調節は行われていなかった。つまり、筋を積極的に制御するのは動作の初期段階だけであり、その後は重力の影響を利用して目的方向へ移動するような制御方略が採用されていたといえる。ただし、スポーツ場面のように、更に大きな推進力を獲得する必要がある際には、下肢伸展モーメントを増大させる必要があるが、その結果発揮される床反力は、動作初期段階での積極的な筋活動により“投げ出された”結果生じる加速方向と一致することが確認された。積極的な力発揮方向が、重力の影響下で身体が傾斜する方向と一致していれば、筋による力発揮はより効果的となる。つまり、ヒトは動作の早い段階で移動方向を決定させ、その方向に沿って外部への力発揮を行うことで、効果的に目的方向への加速度を獲得する方略を用いて多方向移動動作を遂行することが明らかとなった。