

認知感覚運動ループ(CSLs)を用いる

ヒューマノイドロボットの平衡回帰

マサイアス・クビッシュ、クリスティアン・ベンケンドルフ、マンフレッド・ヒルド
ベルリン・フンボルト大学、ニューロロボティクス研究所、ドイツ

`{kubisch|benckend|hild}@informatik.hu-berlin.de`

未知の外乱から平衡を回復させることは人型ロボットの複雑な感覚運動能力によるものであると考えられる。我々はいわゆる認知感覚運動ループ(CSLs)を提示し、その性質を考察して、それがどのようにロボットの動作生成と平衡回帰に使われているかを説明する。この行動能力は、CSLsによって制御されるロボットの1本の足で証明し、複雑な起立動作は独立した関節制御装置の相互作用から生まれることを示していく。さらに我々は、ロボットが変動する傾斜に適応し、妨害の後に平衡を回復させるのにどのようにCSLsが用いられるかを説明する。

キーワード：平衡回帰、感覚運動制御、ヒューマノイドロボット

1. 導入

平衡制御は、自然なシステム、人工的システムのどちらにとっても極めて重要なスキルである。平衡を保つタスクを遂行するために、現代のロボットは豊富な感覚フィードバックを持つが、それらの性能は生物個体の構造安定性には達しない。異なる感覚様式の統合が最終的には最善の解決策を導くのであるが、我々はこの問題に、別の最小主義の視点から近づいていこうと考えている。

本紙では認知感覚運動ループの概念を展開し、それをモジュラー型ヒューマノイドロボットMyonの動作生成と平衡回帰に用いる。この構造は以下の通りである。セクション2で述べられるCSLをもとに我々は、どのようにロボットの1本足が、独立した多数の関節制御装置で複雑な起立動作を行うことができるのかを説明する(Section 3)。ここで我々は、CSLsはヒューマノイドロボットが直立状態を安定させ、妨害の後、例えば押ししたり傾斜を変動させたりした後に平衡を回復させることができると証明する。最後のセクションでは将来の研究の概要を伝える。

2. 認知感覚運動ループ(CSLs)

感覚インプットを原動機アウトプットに接続すること——これはかなりの変化を次々に感覚データに引き起こす——は通常、閉鎖された感覚運動ループと呼ばれる。我々の

ロボット動作における実験の基礎は単純ではあるがいまだ効果的な構造で、図1(左)に描かれている。関節角 $\varphi(t)$ をインプットとして用い、アウトプットは駆動電圧 $u(t)$ である。離散時間の更新ルールは、 $u(t) = -g_i\varphi(t) + [g_i\varphi(t) + g_nu(t)]z^{-1}$, $u(0) = 0$ によって与えられ、ここでは z^{-1} が単位遅延オペレータである。左半分の、インプット経路 $-g_i$, g_i と単位遅延を構成する部分は負号を伴う微分器を形成する。それゆえ、厳密な感覚値は必要ない。速度信号の提供や下位のインプット経路の除去には十分である。右半分は、漏れ積分器や理想積分器、または付加的フィードバックを伴う積分器として機能する。関節角 $\varphi(t)$ 、原動機インプット $u(t)$ は同様の回転感覚を持つと考えられるため、 $u(t) > 0$ である時には原動機は $\dot{\varphi}(t) > 0$ になるよう加速する。

パラメータ g_i や g_f によってCSLは、収縮や開放のような違った行動をロボットに授けるさまざまな状態で作動できる。我々はそれらを行動状態と呼ぶ(概要の表1参照)。

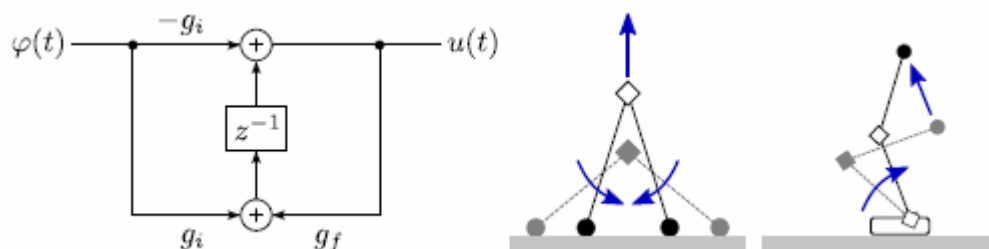


図1 左:CSLの構造。右:重力の影響を受ける異なった形態のための収縮状態で作動するCSL。

例えば、正数の g_i と $0 \leq g_f < 1$ へのフィードバックを設定すると、CSLは開放状態で作動する。駆動電圧は、付加的な流体摩擦の役割をして動作を減速させる負の角速度に比例する。一方、我々が記号 g_i を変更すると、制御ループは現在の動作を補助するようになる。その結果、角速度には正のフィードバックがなされる。

$g_i > 0$ と $g_f = 1$ の設定を選択した場合、感覚運動ループは現在の位置のままであろうとする。定常状態から始めると、我々は $u(t)$ を偏位角度として考えることができる。CSLは、この時点から、停止時に最後に知られた角度位置に置かれた設定値の位置制御装置のように動作するようになる。

以下の場合、行動状態で注目されるのは収縮状態である。あらゆる外力、例えば圧や重力に反する働きをする。ここでは、1より大きいフィードバックパラメータ g_i によって、速度には負のフィードバックがなされ、さらに増幅される。重力の影響を受ける2つの異なった形態に対してのCSLの行動を見て頂きたい(図1右)。収縮状態の特定の性質は、物理系が不安定固定点を通る時に現れる。例えば、直立位置に近づいている、CSLに制御された倒立振子を思い浮かべて欲しい。この場合、速度ひいてはCSLのアウトプットはゼロ交差まで減少して最終的に符号を変える。これは関節駆動機構の回転方向を変え、ついにはこの不安定固定点を安定させるようにするのである。

収縮状態では、値 $u(t)$ は物理系に何が起きているかを暗黙のうちに見抜くことに利用できる。 $u(t)$ がほぼ0である時、物理系は定常状態への過渡、つまり不安定固定点にあるといえる。そうでなければ、もしそれが分岐し、境界線(ここでは $[+1, -1]$)を越えて増

大する傾向にあれば、物理系は、最大限に駆動装置を作動させている間、失速状態に置かれることになる。同様に、CSLは付された重量を経験し、重力に逆らっている間上下を区別するのに使われるかもしれない。そういうわけで、我々はこの感覚運動ループを認知的と呼ぶのである。

物理系の動作、例えばロボットの足は、通常関節の限界に縛られる。望ましくは、これらの限界は自己分析の間に見積もられ、次回の使用のために学習されるべきだ。しかし今のところ、関節の限界に立ち向かう簡単な手段としては、手作業で最大の角位置を認識し、限界に到達した時にCSLを開放状態に設定する方法がある。一方、収縮状態での感覚運動ループは、最大抵抗の方向とそれに逆らうように働く機械的なバリアを感知するだろう。

表1 考える行動状態の概観。それぞれのパラメータ設定は異なる行動を示す。下の図2を参照せよ。

Release	Hold Current Position	Contraction	Support Motion
$g_i > 0$ $0 \leq g_f < 1$	$g_i > 0$ $g_f = 1$	$g_i > 0$ $g_f > 1$	$g_i < 0$ $g_f = 0$

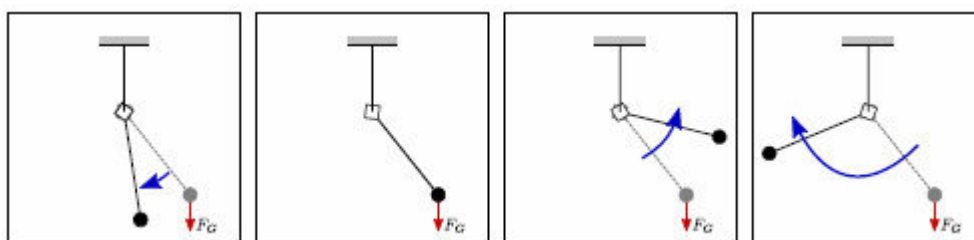


図2 CSLの異なる行動状態は自然に近い動作を生成する。左から右に、開放、現在位置の保持、収縮、外部から誘導された動作の補助。

3. 1本足での起立と平衡回帰

以下において、我々は提案された認知感覚運動ループ(CSLs)を備えたモジュラー型ヒューマノイドロボットMyonの1本の足の制御に焦点を当てていく。ロボットの分散処理ノードと搭載された動力供給によって、1本の足はすでに完全な自律ロボットである。プログラミングコードはロボットに配置されている。また、外部コンピュータとのこれ以上の接続はない。以下に説明される試験実行では、我々は1組の固定されたパラメータだけをCSLsに使用している。腰、膝、そして足首の関節は収縮状態にある局所的なCSLsによって制御されており、図3と図4で概説される複雑な行動連鎖が生じる。

まず、足首、膝、そして大部分が地面と接触し、そして股関節が重量を経験して収縮を始める(1-2)。これにより膝は地面から持ち上がり、膝もまた収縮を始める(3)。ある時点で足はつま先とかかとの上に傾き、全体は宙にあることになる(4)。これが膝関節を回転方向に向けさせ、重力に逆らって動くようになる(5)。他の関節は力と均衡を保

つため足は完全に直立位置になり(6-7)、たとえ押されたり地面が傾いたりしても平衡を保つ。要約すれば、CSLsによって制御される足は、制御の変更なしに(例えば目標値の変更やパラメータの調節なしに)起立し、平衡を保つことができると言える。

より複雑なロボット形態の平衡を保つCSLsの能力を説明するため、我々は図5(右)のようにMyonの別の形状でテストを行った。ここでは、2つのCSLsが左右の股関節に用いられているが、これらは足の側方運動に関与している。収縮状態で使われる時は、CSLは図1の中央のパネルに描かれたものに似た足の動作を作り出す。これはロボットが異なった種類の適度な妨害の後で平衡を回復することを可能にし、地面が傾いたとしても直立姿勢を保つ。

収縮状態のみを使用する時、2本の足の腰部駆動は常に互いに逆らうように動く。ロボットが完全な直立位置にあり、すでに平衡が保たれた時点では、この行動は意図的なものではない。動力装置の無意味な加熱を避けるために、我々は2つの制御装置の間の交差する抑制結合を提案する。これはフィードバック g の調節によってなされ、両者が反対方向に動作する時、効率的に1つのCSLを収縮状態から開放状態へスムーズに変換する。これによって、アウトプット $u(t)$ は正と負の部分に分けられ、式で表せば、 $u+(t) = \max(0, u(t))$ と $u-(t) = \min(0, u(t))$ であるが、図5のようにこれらは他のCSLの i_{\pm} に接続されている。これらのインプットは関節収縮を、正回転でも負回転でも抑止するのである。

その上、この胴体形状では、耐重力やわずかな妨害があっても、直立姿勢で平衡を保つためには1つの股関節だけで十分であることが明らかになった。

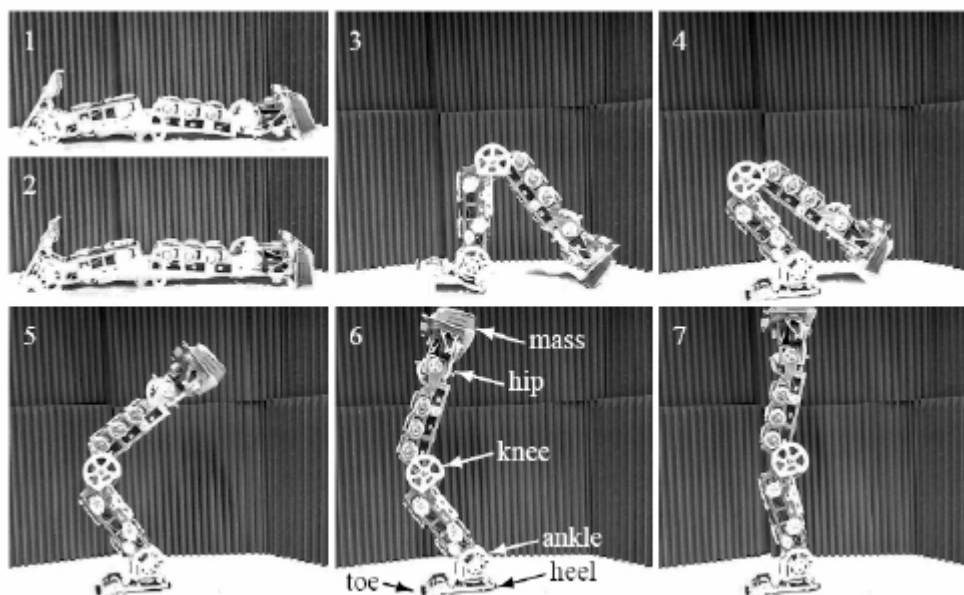


図3 モジュラー型ヒューマノイドロボットMyonの1本の足が、提案されたCSLsを用いて立ち上がる様子。制御装置間で直接のやりとりが行われない一方で、各関節は収縮するCSLによって局所的に制御される。複雑な行動は運動量による相互作用によって生じる。

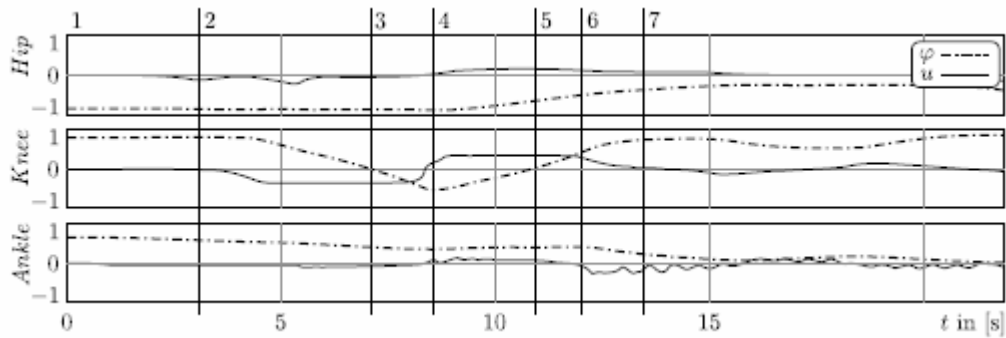


図4 Myonの足の関節角と起立動作における制御アウトプット。番号付けされた縦線は図3のスナップショットに対応している。試験実行は約20秒で、終了時(7)足は止まることはないが、直立位置でわずかな揺れの動きを見せる。

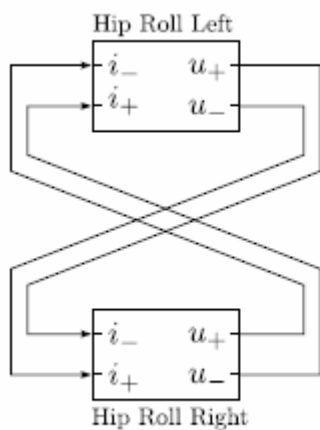


図5 左:ヒューマノイドロボットの左右の腰部駆動を制御している2つのCSL間の交差した抑制結合の概略図。右:平衡を保つ動作をしているときのMyonの下半身部分。頭と腕は付けられていない。股関節の収縮するCSLは体を圧に耐えさせ、直立姿勢を傾斜した地面に適応させる。

4.要旨と展望

我々は、いわゆる認知感覚運動ループ(CSLs)の機能原理について説明し、ヒューマノイドロボットの起立動作生成に対するそれらの利点を示してきた。我々は、どのように複雑な多関節運動が、各関節の位置と速度情報、そして制御装置間の追加連絡なしという厳しく削減された感覚値を用いて、局所的な関節制御装置の相互作用から生じるか明らかにした。

我々は平衡回帰の問題についてもモデルなしの方法でアプローチし、次の段階では矢状面にある運動と外乱を、腕を使って安定させることにアプローチする。今後の研究では、提示されたCSLsを組み入れた、反応リミットサイクル歩行を用いたモデルフリー歩行パターンの生成に焦点が置かれる。

謝辞

本研究の一部はEuropean research project A+EAR (FP7, ICT-214856)の助成を受けている。著者は特別な感謝の意をマリオ・ウエズナーの貢献とMyonの1本足起立に関する彼の提案に対して示す。

参考文献

1. M.ヒルド、M.クビッシュ(2011)『アトラクタに基づく行動制御とABC学習を用いた自律ロボットの自己分析』人工知能についての第14回スカンジナビア会議の議事録、トロンドハイム、ノルウェー
2. M.ヒルド、T.シーデル、C.ベッケンドルフM.クビッシュ、C.シーレ(2011)『Myon:動作中に再構築されるモジュラー型ヒューマノイドロボットのコンセプトとデザイン』登る、歩くロボットについての第14回国際会議の議事録、パリ、フランス
3. A.シュナイダー(2006)『閉鎖運動連鎖における弾性接合の動作制御のための局所的な正速度フィードバック:2DoFアームと3DoF昆虫足のモデリングシミュレーション研究』卒業論文
4. M.ヒルド、M.クビッシュ、S.ホーフアー(2011)『黙示的な体モデルの即時学習のための2次表現ニューロン(QRENS)の利用』ロボティカの議事録、リスボン、ポルトガル
5. M.ヒルド、M.クビッシュ、S.ホーフアー(2010)『感覚運動の状態空間分析のための内的動機付けシステムの提案』エピジェネティック・ロボット工学についての第10回国際会議の議事録、オレナススロット、スウェーデン
6. M.トゥサン(2006)『感覚運動マップ: 予知と計画のための側方相互の制御』「ニューラル・コンピューテーション vol.18」
7. J.H.ソロモン、M.ウィッセ、M.J.ハートマン(2010)『リミットサイクル歩行のための完全相互連結した線形制御』「適応行動 vol.18」