ハイブリッド制御に基づく二足歩行ロボットの 障害物跨ぎ越え*

櫛田 大輔[†]・竹森 史暁[†]・北村 章[†]

Stepping Over Excess of Obstacle for Biped Robot Based on Hybrid Control*

Daisuke KUSHIDA[†], Fumiaki TAKEMORI[†] and Akira KITAMURA[†]

In this research, it paid attention to that system of stepping over the obstacle by biped robot same as HDS, where continuous and discrete event exist together. And it was made to return to optimal control problem after it had expressed by MLDS in consideration of various constraint conditions. In a general ZMP control, because it is necessary to consider the constraint condition and the optimality separately, it complicates by coexistence of two or more control theories. On the other hand, the stepping over excess of the obstacle with biped robot based on the hybrid control can systematically achieve optimum control because it can treat them in the same way. In this paper, it was shown that the stepping over excess of the obstacle with biped robot was able to return in optimal control problem, and the effect was confirmed by the simulation work.

1. まえがき

二足歩行ロボットは人間の歩行動作と同等なものを実現できるため、現在のインフラをそのまま使用できるメリットがある。そのため、より人間に近い動作を目指した歩行の研究が近年盛んに行われている。現在の二足歩行ロボットの歩行に関する研究では、歩行中のロボットにかかる重力と慣性力によるモーメントがゼロになる点を床面上に投影したZMP (Zero Moment Point) を安定領域の内部に限定する方法が主として用いられている[1–3]。しかしながら、ZMP制御は二足歩行ロボットを安定して歩行させるための工学的な解決策の一つであり、人間の歩行原理や人間に近い動作との関連性はあまりない。

つぎに、二足歩行ロボットが歩行する際、遊脚と支持脚が歩行ごとに切り替わるため、離散的な現象が生じていることに着目する。また、階段状のステップや障害物の跨ぎ越えの場合においても、その前後において障害物と遊脚のつま先（もしくはかかと）が干渉しないような拘束条件が状況に応じて離散的に切り替わっている。こ

のような観点から考えると、二足歩行ロボットの歩行動作は、連続的な事象と離散的な事象が混在している系としてとらえることができる。

一方、連続事象と離散事象の混在した系としてHybrid Dynamical System (以下HDS) がある[4,5]。HDSはMLDS (Mixed Logical Dynamical Systems) という表現方法によって論理変数を含んだ線形不等式として定式化することができ[6–8]、最適制御問題として帰着させることが可能であることが知られている。

そこで本研究では、二足歩行ロボットの歩行動作をHDSとしてとらえるとともに、人間の行動決定手法が周辺環境を拘束条件とした最適制御手法と類似していることを考慮して、二足歩行ロボットの歩行動作を運動方程式や拘束条件を含んだ最適制御問題として扱う。その際、平地の歩行に関しては、拘束条件が現在主流のZMPのみとなることから、同様な結果となることが予想されるため、最短経路による障害物跨ぎ越えという動作を対象としてとらえることとする。

2. ハイブリッド制御による跨ぎ越え

2.1 跨ぎ越え動作とハイブリッドシステム

前進二足歩行による障害物の跨ぎ越えはFig. 1に示すような連続事象と離散事象が混在したものとして表現することができる。Fig. 1はmode 1～mode 4に分割されているが、それぞれのmode内では二足歩行ロボットの

* 原稿受付 2006年1月5日

[†] 鳥取大学 工学部 Faculty of Engineering, Tottori University; 4-101 Koyamachominami, Tottori city, Tottori 680-8552, JAPAN

Key Words: hybrid dynamical system, hybrid control, MLDS, biped robot, stride.

Fig. 1 Automaton of biped robot's stride

連続的な動作を示している．それに対し，各 mode 間では，障害物を乗り越える前後や支持脚と遊脚の切替えといった離散的に表現される動作を示している．mode 1 から mode 2 への遷移は，白抜で表現されている脚（遊脚）が点線で表される障害物の境界線を越えた際に行われる．mode 2 から mode 3 への遷移は遊脚が障害物を越えて地面に着地した際に行われる．このとき，白抜で表現されている脚は遊脚から支持脚，黒塗りで表現されている脚は支持脚から遊脚へと機能が切り替わる．mode 3 から mode 4，mode 4 から mode 1 への遷移は新たな遊脚である黒塗りの脚によって同様に行われる．このように，乗り越え動作は mode 1 から mode 4 を遷移することで実現される．しかし，実際には mode の切替えに伴う拘束条件のほかに，ロボットが転倒しないための重心位置の拘束条件，障害物を乗り越えるための拘束条件，機械的にロボットの動作速度を制限する拘束条件などが存在する．これら拘束条件も，二足歩行ロボットと周辺環境との関係に伴って切替えが必要となる．次節よりこれらの拘束条件を導いていく．なお，本論文では前進乗り越え動作を対象としており，後進に関しては考えないものとする．また，動作速度がモータの定格速度に対して中低速となるような一般的な歩行を考える．

2.2 乗り越え実現のための拘束条件

2.2.1 モード切替えの拘束条件

Fig. 2 に mode 1 から mode 2，mode 2 から mode 3 へと切り替わる様子を示している．(a) より mode 1 が mode 2 に切り替わる直前の状態は，ロボットのつま先 Q は障害物の右上 O よりも右側に存在している必要がある．また，(b) より mode 2 から mode 3 に切り替わる直前の状態は，ロボットのかかと P は地面近傍の高さを示している z_ϵ ($z_\epsilon > 0$) よりも上部に存在している必要がある．これらを式で表現すると以下のような拘束条件が導かれる．

Fig. 2 Condition of mode switching

$$x_q \geq x_o \quad (1)$$

$$z_p \geq z_\epsilon \quad (2)$$

つまり，Fig. 2 の太線で表現されている遊脚に関して (1), (2) 式の条件を両方満たしている場合は mode 1，mode 1 の状態において，(1) 式の条件を満たさなくなった場合は mode 2，mode 2 の状態において，(2) 式の条件を満たさなくなった場合は mode 3（このとき遊脚は細線で表現される脚へ切り替わり，同時に (1), (2) 式は満たされることとなる），mode 3 の状態において，(1) 式の条件を満たさなくなった場合は mode 4 となる．

2.2.2 重心位置の拘束条件

二足歩行ロボットが転倒しないための手法として一般的に静歩行があるが，今回は人間と同じ歩行である動歩行を考えていく．動歩行は重心位置を足底接地面より外しながら歩行を行う手法であり，今回は動歩行の中でも受動歩行という倒れ込みを利用した歩行形態を対象とした．この受動歩行では，重心位置が両脚のつま先とかかとの間に入っていれば転倒することはないため，これを拘束条件として式で表現すると

$$[x_q^s \leq x_q^l] \Rightarrow [x_q^s \leq G_x \leq x_p^l] \quad (3)$$

$$[x_q^s > x_q^l] \Rightarrow [x_q^l \leq G_x \leq x_p^s] \quad (4)$$

となる．ここで G_x は二足歩行ロボットの重心を X 軸座標に投影した値， x_q^s , x_p^s は遊脚のつま先とかかとの位置を X 軸座標に投影した値， x_q^l , x_p^l は支持脚のつま先とかかとの位置を X 軸座標に投影した値である．また，遊脚と支持脚は前節で説明した mode の状態によって切り替わるものとする．

一般的に歩行を行う際には，加速度の実現性を考慮するため ZMP が支持脚の足裏に収まる必要があるが，今回は加速度の小さい中低速動作を対象としているため，特に ZMP は考慮せずともその条件は満足されると仮定し，重心位置のみの拘束条件とした．

2.2.3 障害物の拘束条件

つぎに，障害物を乗り越える際の拘束条件について考えていく．Fig. 3 に遊脚が障害物を乗り越える際の様子を示している．(a) は障害物を乗り越える前の様子であ

るが、この後、障害物と遊脚のつま先との接触を避けながら、遊脚を障害物の上部へと運ぶ必要がある。遊脚つま先 Q が障害物の右上 O より右側にある場合は、 Q の高さは地面より高ければ問題はないが、 Q が O より左側にある場合、遊脚のすね部分は O の上部になければならない。この拘束条件を式で表現すると

$$[x_q \geq x_o] \Rightarrow [z_q \geq 0] \quad (5)$$

$$[x_q < x_o] \Rightarrow [g(x_f, z_f, \phi) \geq 0] \quad (6)$$

となる。ただし

$$g(x_f, z_f, \phi) = (x_o - x_f) \sin \phi - (z_o - z_f) \cos \phi + \frac{r}{2}$$

である。また、(b) は障害物を跨ぎ越え終える前の様子であるが、この後、障害物と遊脚かかととの接触を避けながら、遊脚を障害物の先へと着地させる必要がある。遊脚かかと P が障害物の左上 R より右側にある場合は、 P の高さは R より高ければ問題はない。しかし、 P が R より左側にある場合、遊脚を障害物の左側に垂直に着地させるために、遊脚のすね部分は R の上部になければならない。このような拘束条件を式で表現すると

$$[x_p \geq x_r] \Rightarrow [z_p \geq z_r] \quad (7)$$

$$[x_p < x_r] \Rightarrow [h(x_f, z_f, \phi) \geq 0] \quad (8)$$

となる。ただし

$$h(x_f, z_f, \phi) = (x_r - x_f) \sin \phi - (z_r - z_f) \cos \phi - \frac{r}{2}$$

である。

2.2.4 動作速度の拘束条件

これまででは物理的な拘束に関して考慮してきたが、実際にロボットを駆動させるモータにおいてもトルクや速度に関する拘束があるのが一般的である。いま、Fig. 3 における二足歩行ロボットの膝関節 F を基にして、その位置と角度で表現された運動方程式を

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (9)$$

(a) Before over the obstacle (b) After over the obstacle

Fig. 3 Constraint based on relationship between obstacle and leg position

$$\begin{cases} x(k) = [x_f(k), z_f(k), \phi(k)]^T \\ u(k) = [u_{x_f}(k), u_{z_f}(k), u_\phi(k)]^T \\ A = (1 - \frac{\Delta t}{\tau}) I_3, \quad B = (\frac{\Delta t}{\tau}) I_3 \end{cases}$$

という 1 次系で表現する。ここで、 $x_f(k)$, $z_f(k)$ はそれぞれロボット膝関節 F の X 座標、Z 座標であり、 $\phi(k)$ は膝関節と X 軸との角度である (Fig. 3 参照)。また、 $u_{x_f}(k)$, $u_{z_f}(k)$, $u_\phi(k)$ は $x_f(k)$, $z_f(k)$, $\phi(k)$ に対する制御入力、 τ および Δt はそれぞれ時定数とサンプリング時間間隔、 I_3 は 3×3 の単位行列である。一般的には詳細な非線形モデルを用いることが望ましいが、二足歩行ロボットの各リンクが独立線形モデルとして扱える中低速動作の範囲内であることを考慮すると、(9) 式でも十分代用可能である。ロボットのトルクや速度に関する拘束を、サンプリング時間間隔ごとの入力偏差に制限をかけることで表現すると拘束条件は

$$|u(k) - u(k-1)| \leq [M_{x_f}, M_{z_f}, M_\phi]^T \quad (10)$$

として表される。ここで、 M_{x_f} , M_{z_f} , M_ϕ はそれぞれ膝関節座標の X 軸方向への最大移動可能量、Z 軸方向への最大移動可能量、膝関節下脚の最大回転可能量である。この拘束条件は二足歩行ロボットを駆動するために用いられているすべてのモータに依存するものであり、そのため各モータの拘束条件は (10) 式ですべて表現することができているととらえることができる。実際のモータの駆動は (10) 式を満たすような $u(k)$ が求まった後、それを実現するモータの目標速度を逆算し、それに従うよう PID 制御を行うことで実現する。

2.3 MLDS による定式化

これまで二足歩行ロボットが障害物の跨ぎ越えを行うにあたり、必要となる拘束条件を導いてきた。いま、二足歩行ロボットで障害物を跨ぎ越える動作を MLDS で表現するために、拘束条件 (1)~(8) 式の各要素に対して論理変数 δ を

$$[x_q \geq x_o] \Leftrightarrow [\delta_1 = 1] \quad (11)$$

$$[z_p \geq z_r] \Leftrightarrow [\delta_2 = 1] \quad (12)$$

$$[x_q^s \leq x_p^l] \Leftrightarrow [\delta_3 = 1] \quad (13)$$

$$[x_q^l \leq G_x \leq x_p^s] \Leftrightarrow [\delta_4 = 1] \quad (14)$$

$$[x_q^s \leq G_x \leq x_p^l] \Leftrightarrow [\delta_5 = 1] \quad (15)$$

$$[x_q \geq x_o] \Leftrightarrow [\delta_6 = 1] \quad (16)$$

$$[z_q \geq 0] \Leftrightarrow [\delta_7 = 1] \quad (17)$$

$$[g(x_f, z_f, \phi) \geq 0] \Leftrightarrow [\delta_8 = 1] \quad (18)$$

$$[x_p \geq x_r] \Leftrightarrow [\delta_9 = 1] \quad (19)$$

$$[z_p \geq z_r] \Leftrightarrow [\delta_{10} = 1] \quad (20)$$

$$[h(x_f, z_f, \phi) \geq 0] \Leftrightarrow [\delta_{11} = 1] \quad (21)$$

のように割り当てる。すると、(1)~(8) 式は

$$\delta_1 = 1 \quad (22)$$

$$\delta_2 = 1 \quad (23)$$

$$[\delta_3 = 1] \Rightarrow [\delta_4 = 1] \quad (24)$$

$$[\delta_3 = 0] \Rightarrow [\delta_5 = 1] \quad (25)$$

$$[\delta_6 = 1] \Rightarrow [\delta_7 = 1] \quad (26)$$

$$[\delta_6 = 0] \Rightarrow [\delta_8 = 1] \quad (27)$$

$$[\delta_9 = 1] \Rightarrow [\delta_{10} = 1] \quad (28)$$

$$[\delta_9 = 0] \Rightarrow [\delta_{11} = 1] \quad (29)$$

のような論理式に書き直すことができる。つぎに、このような論理式を不等式へ変換していく。いま、(22), (23) 式を例に取ると (11), (12) 式を基にして

$$\begin{cases} x_q - (M_x - x_o + \epsilon)\delta_1 - x_o + \epsilon \leq 0 \\ -x_q + (x_o - m_x)\delta_1 + m_x \leq 0 \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} z_p - (M_z - z_\epsilon + \epsilon)\delta_2 - z_\epsilon + \epsilon \leq 0 \\ -z_p + (z_\epsilon - m_z)\delta_2 + m_z \leq 0 \end{cases} \quad (31)$$

として、不等式へ変換することができる。ただし

$$\begin{cases} m_x \leq x_q \leq M_x \\ m_z \leq z_p \leq M_z \\ \epsilon > 0 \end{cases}$$

であり、 $\epsilon > 0$ は十分に小さな正の定数、 m_x, M_x はそれぞれ x_q の取り得る最小値と最大値、 m_z, M_z はそれぞれ z_p の取り得る最小値と最大値である。同様に (24)~(29) 式に関しても等価な不等式に変換すると

$$\delta_3 - \delta_4 \leq 0 \quad (32)$$

$$1 - \delta_3 - \delta_5 \leq 0 \quad (33)$$

$$\delta_6 - \delta_7 \leq 0 \quad (34)$$

$$1 - \delta_6 - \delta_8 \leq 0 \quad (35)$$

$$\delta_9 - \delta_{10} \leq 0 \quad (36)$$

$$1 - \delta_9 - \delta_{11} \leq 0 \quad (37)$$

となる。以上のように二足歩行ロボットの跨ぎ越え動作を MLDS 形式で記述することができる。

2.4 最適制御問題

ハイブリッドシステムを MLDS として記述することで、ある種の最適性の指標のもと、制御方策を決定することが知られている [8]。本論文では評価関数を

$$J = \sum_{k=0}^{K-1} \left[\left\{ \frac{x_f(k) - x^d}{W_x} \right\}^2 + \left\{ \frac{z_f(k) - z^d}{W_z} \right\}^2 + \left\{ \frac{\phi(k) - \phi^d}{W_\phi} \right\}^2 \right] \quad (38)$$

として設定した。ここで、 x^d, z^d, ϕ^d は次ステップでの $x_f(k), z_f(k), \phi(k)$ の目標位置であり、 W_x, W_z, W_ϕ は (38) 式右辺の各項の重みである。重みの意味は各項が評価値 J に及ぼす比率として解釈されたい。本最適制御問題では、時刻 k ごとに (30)~(37) 式の拘束条件を満たし、

(38) 式の評価関数を最小にする $u_{xf}(k), u_{zf}(k), u_\phi(k)$ を求める。これは、実変数と離散変数を決定変数とすることから混合整数計画問題を解くことで最適解を得ることができる。

3. 跨ぎ越えシミュレーション

前章で説明した混合整数計画問題を解き、歩行動作のシミュレーションを行った。問題の解法には MS-Excel2003 に付属するソルバーアドインを用いた。ソルバーアドインは拘束条件を満足しながら評価式を最小化する機能を有しているが、リアルタイムにて最適化計算を行うことはできない。そのため、今回はシミュレーションによる検証のみに留まっているが、本手法の本質を損なうものではない。本論文で提案している手法は、現在の脚位置に基づく拘束条件を満足しながら、次ステップにて到達すべき目標脚位置へ動作するための制御入力の評価関数を最小にするよう逐次求めるものである。これは一般的にフィードバック形式になるが、上述したようにリアルタイム計算を行うことができないため、ロボットの挙動をあらかじめ想定してフィードフォワード形式にてシミュレーションを行った。対象とする二足歩行ロボットは下半身のみであり、全長 0.9[m]、股関節から膝関節までが 0.45[m]、膝関節から着地面までが 0.45[m]、また、つま先からかかとの距離は 0.18[m] である。ロボットの質量は (9) 式に含めて考えるため、特に定める必要はないが、各リンクの重心位置はリンクの中心にあるものと仮定する。その他のシミュレーション条件は Table 1 に示す。また、シミュレーション結果を Figs. 4~7 に示している。

Fig. 4 は、二足歩行ロボットの重心位置の推移と拘束条件との関係、Fig. 5 は遊脚と障害物の位置関係と拘束条件との関係、Fig. 6 は二足歩行ロボットへの制御入力と制御入力の拘束条件との関係、Fig. 7 はシミュレーション結果を視覚化したものを示している。

Fig. 4 では、実線が重心位置、点線が重心位置の上限、破線が重心位置の下限となっているが、重心位置は常に上下限内に入っており、(3), (4) 式で表されている拘束条件を満たしていることがわかる。

Fig. 5(a-1), (a-2) は、Fig. 3 の太線で表されている脚が遊脚である場合の (5)~(8) 式で表現される拘束条件の

Fig. 4 Results of the stride of biped robot under COG constraints

Fig. 5 Results of the stride of biped robot under obstacle constraints

様子を表しており、(b-1)、(b-2)はFig. 3の細線で表されている脚が遊脚である場合の(5)～(8)式で表現される拘束条件を表している。また、図中の破線は拘束条件を満たしているかどうかを示す補助線である。まず(a-1)を見てみると、 x_q が障害物のO点(Fig. 3参照)よりも右側(0.67[m]以上)にある場合、 $z_q > 0$ となっていることがわかる。これは拘束条件(5)式を表しており、その条件を満たしていることを示している。また、 x_q が障害物のO点(Fig. 3参照)よりも左側(0.67[m]未満)にある場合、 $g(x_f, z_f, \phi) > 0$ となっていることがわかる。これは拘束条件(6)式を表しており、その条件を満たしていることを示している。つぎに(a-2)を見てみると、 x_p が障

害物のR点(Fig. 3参照)よりも左側(0.47[m]以上かつ0.67[m]未満)にある場合、 $z_p > z_r$ ($z_r = 0.19$ [m])となっていることがわかる。これは拘束条件(7)式を表しており、その条件を満たしていることを示している。また、 x_p が障害物のR点(Fig. 3参照)よりも左側(0.47[m]未満)にある場合、 $h(x_f, z_f, \phi) > 0$ となっていることがわかる。これは拘束条件(8)式を表しており、その条件を満たしていることを示している。(b-1)、(b-2)からもFig. 3の細線で表されている脚に関して同様に拘束条件(5)～(8)式を満たしていることがいえる。

Fig. 6(a-1)～(a-3)は、Fig. 3において太線で表されている脚に関する制御入力の差分を示しており、それぞれ u_{xf} 、 u_{zf} 、 u_ϕ に関するものである。(b-1)～(b-3)はFig. 3において細線で表されている脚に関する制御入力の差分を示しており、それぞれ u_{xf} 、 u_{zf} 、 u_ϕ に関するものである。また、破線はそれぞれ制御入力の差分の上限および下限を示している。これらを見ると太線・細線で示された両脚それぞれへの制御入力が(38)式を基に入力制限内で生成されていることがわかる。

Fig. 7は、シミュレーションによって得られたデータを基にアニメーションを作成し、実際に二足歩行ロボットが障害物を跨ぎ越えている様子をFig. 1に示すmode 1～mode 4それぞれに示したものである。

これらより、ロボット自身の身体的特徴をも含めた周

Table 1 Simulation conditions

Nomenclature	Value	Unit
Simulation step k:	31	
Initial of $Q = (x_q, z_q)$ (swing)	(1.126, 0.033)	[m]
Initial of $P = (x_p, z_p)$ (swing)	(1.282, 0.093)	[m]
Initial of $F = (x_f, z_f)$ (swing)	(0.979, 0.044)	[m]
Initial of $Q = (x_q, z_q)$ (lift)	(0.726, 0.015)	[m]
Initial of $P = (x_p, z_p)$ (lift)	(0.906, 0.015)	[m]
Initial of $F = (x_f, z_f)$ (lift)	(0.816, 0.465)	[m]
Obstacle $O = (x_o, z_o)$	(0.67, 0.19)	[m]
Obstacle $R = (x_r, z_r)$	(0.47, 0.19)	[m]
M_{xf}, M_{zf}, M_ϕ	0.2, 0.2, 2.618	[m],[m],[rad]
W_x, W_z, W_ϕ	1.0, 1.0, 1.0	

Fig. 6 Results of the stride of biped robot under input constraints

Fig. 7 Results of robot's stride over the rectangle obstacle

辺環境に対して拘束条件を設け、最適制御手法に基づき制御入力を生成することで、より人間の行動決定手法に近い障害物跨ぎ越えを実現できたといえる。

ここで、本手法のロバスト性に関して述べておく。今回用いたハイブリッド制御では、ロボットのモデルを基にした拘束条件が含まれている。モデルにはモデル化誤差が含まれてるのが一般的であり、実験時にはさらに外乱が混入することが考えられる。本論文ではこれらに関する考慮を行っていないため、実験を行う場合には悪影響を受けることが予想される。しかし、実際に人間が行動する際には無意識に拘束条件に余裕を持たせていることを考慮すると、今回設定した拘束条件を緩和することでモデル化誤差や外乱に対するロバスト性が確保できるものと考えられる。

また、今回はリアルタイムにて最適化計算を行うことができないため、フィードフォワード的にシミュレーションを行ったが、同様にして実験を行う場合にはモデル化誤差によって、実ロボットの位置と想定している位置との間にずれが生じることが考えられる。これに関しては、数度のサンプリングに一度実ロボットの位置を用いた最適化計算を行うことで位置ずれを修正することを考えている。これはサンプリングごとのリアルタイム計算ではないため、現状で十分可能である。

4. あとがき

本論文では、二足歩行ロボットが障害物を跨ぎ越える際の連続事象と離散事象に着目するとともに、人間の行動決定手法が周辺環境の拘束条件を考慮している点に着目した。跨ぎ越えで必要となる拘束条件を導出し、論理変数を割り当てることで連続事象と離散事象の混在する系を MLDS で記述した。また、跨ぎ越えが最短経路となるよう脚の軌道面積が最小となる評価関数を設定し、最適制御問題としてシミュレーションを行った。その結果、すべての拘束条件を満たしつつ、評価関数を最小とするような制御入力が生成され、人間の行動決定手法に近い二足歩行ロボットの障害物跨ぎ越えの実現可能性が確認できた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、数値計算による本手法の検証に尽力頂いた藤木三朗氏（日本イーライリリー株式会社）に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- [1] M. Vukobratovich, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic: *Biped Locomotion, Dynamics, Stability, Control and Application*, Springer Verlag (1990)
- [2] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: The development of Honda humanoid robot; *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1321–1326 (1998)

- [3] 水戸部, 矢島, 那須: ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御; 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 359–365 (2000)
- [4] Hybrid systems I, II, III, IV, V, *Lecture Notes in Computer Science*, 736, 999, 1066, 1273, 1567, Springer-Verlag (1993, 1995, 1996, 1997, 1998)
- [5] ハイブリッドシステム—システム制御への新たな視点総合特集号; システム/制御/情報, Vol. 46, No. 3, pp. 105–157 (2002)
- [6] A. Bemporad and M. Morari: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints; *Automatica*, Vol. 35, No. 3, pp. 407–427 (1999)
- [7] 浅野, 津田, A. Bemporad, M. Morari: ハイブリッドシステムの予測制御とそのプロセス制御への適用; システム/制御/情報, Vol. 46, No. 3, pp. 110–119 (2002)
- [8] K. Hirana, T. Suzuki and S. Okuma: Optimal motion planning for peg-insertion task based on mixed logical dynamical system framework; *SICE Annual Conference 2002*, pp. 1165–1170 (2002)