

LOCOMOTION HUMANOÏDE : DU SOL PLAT AU TOUT-TERRAIN

Stéphane Caron

8 mars 2017

Présentation donnée à SoftBank Robotics Europe, Paris

MARCHE SUR SOL PLAT

Système différentiel du marcheur

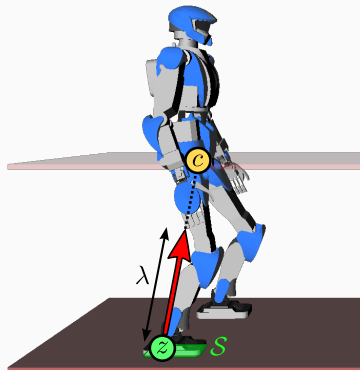
$$\ddot{c} = \lambda(c - z) + g$$

- Centre de pression : $z \in \mathcal{S}$
- Poussée : $\lambda > 0$

Pendule linéaire inversé (LIPM)

- Contacts coplanaires $\Rightarrow \mathcal{S}$ connu
- COM dans un plan $\Rightarrow \lambda$ constant

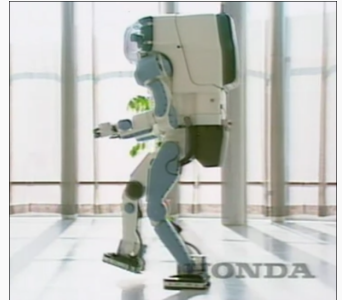
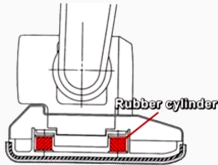
Donc : marche sur sol plat



1. Shuuji KAJITA, Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Kazuhito YOKOI et Hirohisa HIRUKAWA. « The 3D Linear Inverted Pendulum Mode : A simple modeling for a biped walking pattern generation ». In : *Intelligent Robots and Systems*, 2001. T. 1. IEEE. 2001, p. 239–246.

Démonstration publique en 1998 :

- Contrôle du « Zero » Moment Point (ZMP)
- Contrôle de la force de réaction du sol
- Absorption des impacts :



2. Kazuo HIRAI, Masato HIROSE, Yuji HAIKAWA et Toru TAKENAKA. « The development of Honda humanoid robot ». In : *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*. T. 2. IEEE. 1998, p. 1321–1326.

Centre de pression (COP)

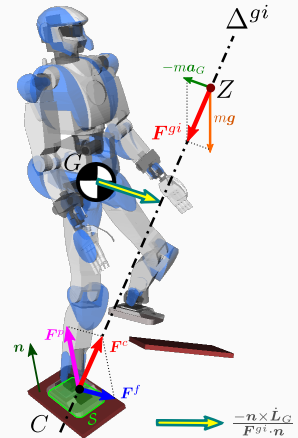
Point C sur la surface de contact $\mathcal{S}$ où s'applique la résultante des forces de pression F^p , c-à-d : $\tau_0^p = \vec{OC} \times F^p$

Zero-tilting Moment Point (ZMP)

Points Z où le moment du torseur gravito-inertiel s'aligne sur la normale n de $\mathcal{S}$

Proposition (SARDAIN & BESSONNET)

L'axe des ZMP intersecte $\mathcal{S}$ en C



3. P. SARDAIN et G. BESSONNET. « Forces acting on a biped robot. center of pressure-zero moment point ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans* 34.5 (2004), p. 630–637.

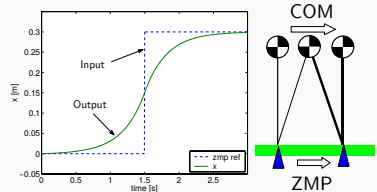
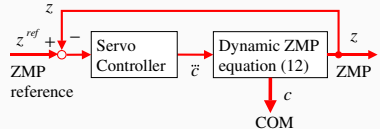
COM sur chariot (CART-table model)

$$z = c + (g - \ddot{c})/\lambda$$

- z devient une sortie
- $\ddot{c}$ devient la commande

Toujours en marche sur sol plat :

- Positions des pas $\Rightarrow z^{\text{ref}}$
- Commande prédictive $\Rightarrow c(t)$



4. Shuuji KAJITA, Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Kiyoshi FUJIWARA, Kensuke HARADA, Kazuhito YOKOI et Hirohisa HIRUKAWA. « Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 2. IEEE. 2003, p. 1620–1626.

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k]$$

$$z[k] = Cx[k]$$

$$u[k] = \ddot{c}[k]$$

$$x[k] = \begin{bmatrix} c[k] & \dot{c}[k] & \ddot{c}[k] \end{bmatrix}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} T^3/6 & T^2/2 & T \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1/\lambda \end{bmatrix}^T$$



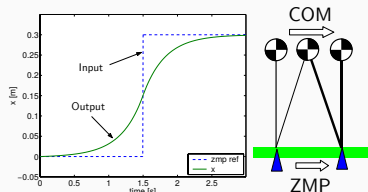
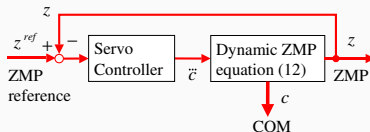
5. Shuuji KAJITA, Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Kiyoshi FUJIWARA, Kensuke HARADA, Kazuhito YOKOI et Hirohisa HIRUKAWA. « Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 2. IEEE. 2003, p. 1620–1626.

Étant donnée une fonction de coût :

$$\begin{aligned}
 J = & \sum_k w_z \|z[k] - z^{\text{ref}}[k]\|^2 \\
 & + w_x \|x[k] - x[k-1]\|^2 \\
 & + w_u \|u[k]\|^2
 \end{aligned}$$

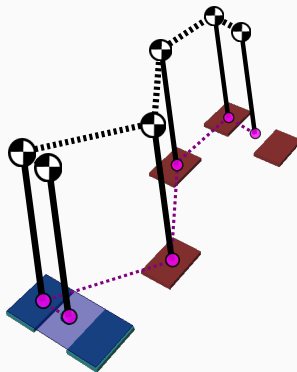
Le contrôle optimal est calculable :

$$\begin{aligned}
 u^*[k] = & - \sum_{i=0}^k G_z (z[i] - z^{\text{ref}}[i]) \\
 & - G_x x[k] \\
 & - \sum_{j=k+1}^N G_p[j] z^{\text{ref}}[j]
 \end{aligned}$$



6. Shuuji KAJITA, Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Kiyoshi FUJIWARA, Kensuke HARADA, Kazuhito YOKOI et Hirohisa HIRUKAWA. « Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 2. IEEE. 2003, p. 1620–1626.

- Le COM est maintenu dans un plan parallèle au sol
- Le ZMP doit appartenir à l'enveloppe convexe des points de contact⁷
- Chaque empreinte nous donne un ZMP de référence z^{ref}
- La commande prédictive connecte les états par des trajectoires $c(t), z(t)$



7. Cette construction n'est valide que si l'on ignore les frottements. Sur sol glissant, la zone est plus petite car il faut lui adjoindre une condition supplémentaire : que le COM appartienne au cône de friction projeté à partir du ZMP (voir ci-après).

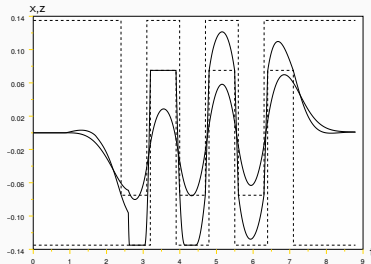
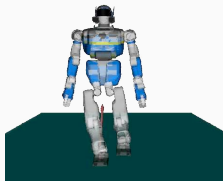
La régulation LQR :

$$\min_{u[0], u[1], \dots} \sum_k w_z \|z[k] - z^{\text{ref}}[k]\|^2 + w_u \|u[k]\|^2$$

Peut être remplacée par un programme quadratique (QP) :

$$\min_{u[0], u[1], \dots} \sum_k \|u[k]\|^2$$
$$\text{t.q. } \forall k \quad z^{\min}[k] \leq z[k] \leq z^{\max}[k]$$

Avantage : plus de référence, saturation des contraintes



8. Pierre-Brice WIEBER. « Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations ». In : *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*. IEEE. 2006, p. 137–142.

Décomposition plan des composantes stable et instable du pendule inverse :

$$\ddot{c} = \omega_{2D}^2(c - z), \quad \omega_{2D}^2 = g/h$$

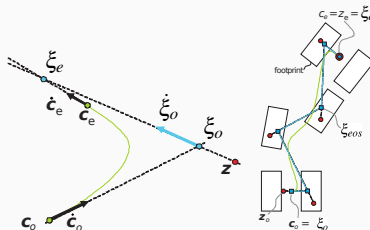
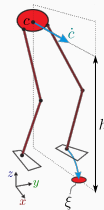
Capture Point dans le plan

$$\xi \stackrel{\text{def}}{=} c + \dot{c}/\omega$$

$$\dot{\xi} = \omega(\xi - z)$$

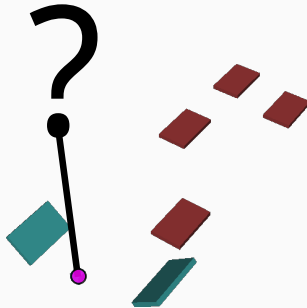
Interprétation : le point ξ est tel que, si on y fixe $z(t \geq T) = \xi$, alors

$$c(t) \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{} \xi$$



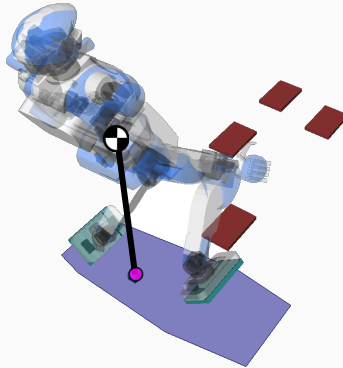
9. Johannes ENGLSBERGER, Christian OTT, Máximo A ROA, Alin ALBU-SCHÄFFER et Gerhard HIRZINGER.
« Bipedal walking control based on capture point dynamics ». In : *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2011, p. 4420–4427.

Que faire quand les contacts ne sont pas coplanaires ?



MARCHE TOUT-TERRAIN

On peut toujours calculer la zone de support du ZMP :

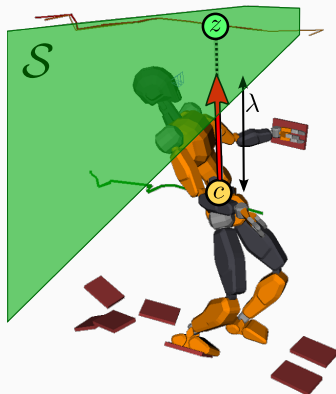


Il y a alors un ZMP corps-complet et plusieurs COPs (un par contact)

Système différentiel du marcheur

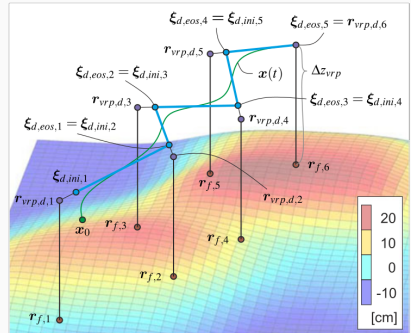
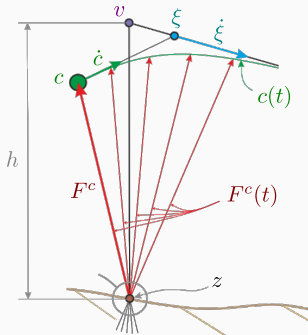
$$\ddot{c} = \lambda(c - z) + g$$

- ZMP corps-complet : $z \in \mathcal{S}$
 - Poussée : $\lambda > 0$
-
- $\mathcal{S}$ est calculable en multi-contact
 - Mais varie avec la position du COM
 - Ce n'est pas toujours un polygone



10. Stéphane CARON, Quang-Cuong PHAM et Yoshihiko NAKAMURA. « ZMP Support Areas for Multi-contact Mobility Under Frictional Constraints ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.1 (fév. 2017), p. 67–80.

La construction géométrique s'étend à la 3D avec le DCM $\xi \stackrel{\text{def}}{=} c + \dot{c}/\lambda$ où la constante λ est choisie par l'utilisateur. Le ZMP devient le VRP $v \stackrel{\text{def}}{=} z - g/\lambda$:



11. Johannes ENLSBERGER, Christian OTT et Alin ALBU-SCHAFER. « Three-dimensional bipedal walking control based on divergent component of motion ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 31.2 (2015), p. 355–368.

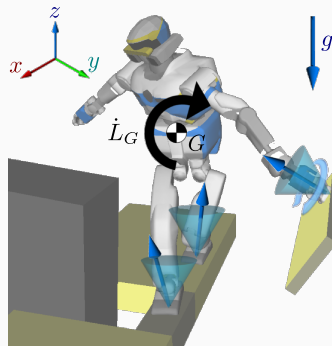
Équations de Newton-Euler

$$\begin{aligned}\ddot{c} &= \frac{1}{m} \sum_i F_i + g \\ \dot{L}_G &= \sum_i \vec{GC}_i \times F_i + \tau_{C_i}\end{aligned}$$

Idée : non-linéaire mais si on fixe les $F^z[k] = \sum_i F_i^z[k]$ alors le reste est linéaire

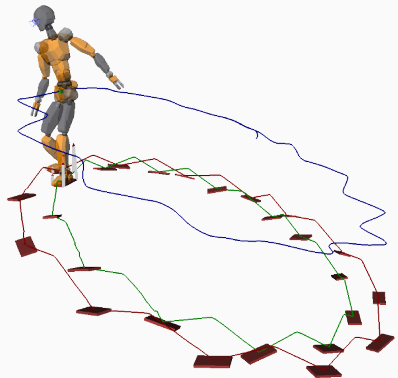
Contraintes pour tous k [CPN15]

- Non-glissement : $|F_i^{xy}| \geq \mu_i F_i^z$
- Non-basculement : $|\tau_{C_i}^x| \leq Y F_i^z$ (idem y)



12. Hervé AUDREN, Joris VAILLANT, Abderrahmane KHEDDAR, Adrien ESCANDE, Kenji KANEKO et Eiichi YOSHIDA. « Model preview control in multi-contact motion-application to a humanoid robot ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2014, p. 4030–4035.

- Commande prédictive du cas général avec poussées λ non-constantes
- Idée : on intersecte les variations de $\mathcal{S}$ sur un horizon court
- Contrôleur **temps-réel** de marche **tout-terrain** [CK16]
- Limitation : longues phases de double-support, démarche pas vraiment dynamique

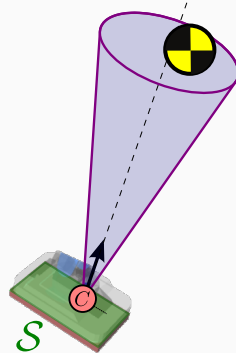


13. Stéphane CARON et Abderrahmane KHEDDAR. « Multi-contact Walking Pattern Generation based on Model Preview Control of 3D COM Accelerations ». In : *Humanoid Robots, 2016 IEEE-RAS International Conference on*. Nov. 2016.

En simple support, on connaît la construction géométrique de la condition de stabilité du contact :

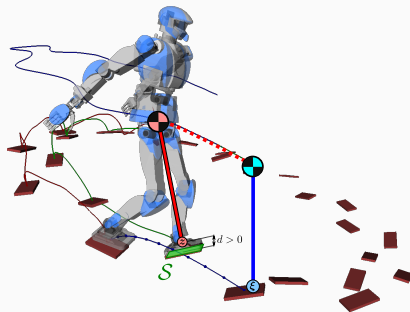
Stabilité du contact simple support

1. Le COP C appartient à la zone de contact S
2. Le COM appartient au cône de frottements projeté depuis C



14. Stéphane CARON et Abderrahmane KHEDDAR. « Dynamic Walking over Rough Terrains by Non-linear Predictive Control of the Floating-base Inverted Pendulum ». working paper or preprint. Mar. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01481052>.

- Nouveau modèle du pendule inversé *flottant*
- Feed-forward par commande prédictive non-linéaire (30 Hz)
- Feed-back par régulation linéaire-quadratique sous contrainte (300 Hz)
- En sortie : démarche dynamique, plus de 60% du temps en non-quasi-statique



15. Stéphane CARON et Abderrahmane KHEDDAR. « Dynamic Walking over Rough Terrains by Non-linear Predictive Control of the Floating-base Inverted Pendulum ». working paper or preprint. Mar. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01481052>.

DISCUSSION !



Hervé AUDREN, Joris VAILLANT, Abderrahmane KHEDDAR, Adrien ESCANDE, Kenji KANEKO et Eiichi YOSHIDA. « Model preview control in multi-contact motion-application to a humanoid robot ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2014, p. 4030–4035.



Stéphane CARON et Abderrahmane KHEDDAR. « Multi-contact Walking Pattern Generation based on Model Preview Control of 3D COM Accelerations ». In : *Humanoid Robots, 2016 IEEE-RAS International Conference on*. Nov. 2016.



Stéphane CARON et Abderrahmane KHEDDAR. « Dynamic Walking over Rough Terrains by Nonlinear Predictive Control of the Floating-base Inverted Pendulum ». working paper or preprint. Mar. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01481052>.



Stéphane CARON, Quang-Cuong PHAM et Yoshihiko NAKAMURA. « Stability of Surface Contacts for Humanoid Robots : Closed-Form Formulae of the Contact Wrench Cone for Rectangular Support Areas ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2015.



Stéphane CARON, Quang-Cuong PHAM et Yoshihiko NAKAMURA. « ZMP Support Areas for Multi-contact Mobility Under Frictional Constraints ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.1 (fév. 2017), p. 67–80.



Johannes ENGLSBERGER, Christian OTT, Máximo A ROA, Alin ALBU-SCHÄFFER et Gerhard HIRZINGER. « Bipedal walking control based on capture point dynamics ». In : *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2011, p. 4420–4427.



Johannes ENGLSBERGER, Christian OTT et Alin ALBU-SCHÄFFER. « Three-dimensional bipedal walking control based on divergent component of motion ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 31.2 (2015), p. 355–368.



Kazuo HIRAI, Masato HIROSE, Yuji HAIKAWA et Toru TAKENAKA. « The development of Honda humanoid robot ». In : *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*. T. 2. IEEE. 1998, p. 1321–1326.



Shuuji KAJITA, Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Kazuhito YOKOI et Hirohisa HIRUKAWA. « The 3D Linear Inverted Pendulum Mode : A simple modeling for a biped walking pattern generation ». In : *Intelligent Robots and Systems, 2001*. T. 1. IEEE. 2001, p. 239–246.



Shuuji KAJITA, Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Kiyoshi FUJIWARA, Kensuke HARADA, Kazuhito YOKOI et Hirohisa HIRUKAWA. « Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 2. IEEE. 2003, p. 1620–1626.



P. SARDAIN et G. BESSONNET. « Forces acting on a biped robot. center of pressure-zero moment point ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans* 34.5 (2004), p. 630–637.



Pierre-Brice WIEBER. « Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations ». In : *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*. IEEE. 2006, p. 137–142.