



UNIVERSITÉ  
TOULOUSE III  
PAUL SABATIER



Université  
de Toulouse



Présentation d'un article scientifique de Robotique Avancée

Chris Ibrahim  
Yoann Fleytoux

# A Kinodynamic steering-method for legged multi-contact locomotion

- HAL 26 Juillet 2017

**Auteurs: Pierre Fernbach, Steve Tonneau, Andrea Del Prete, Michel Taïx**

À l'attention de F. Ingrand, S. Tonneau, M. Taïx

3ASRI - 15/01/2018

# Plan

Contexte et objectifs

Etat de l'art

Contributions

Résultats

Conclusions

# Contexte et objectif

## Quelques définitions

planification de mouvement

kinodynamique: classe de problèmes de planification de mouvement satisfaisant des contraintes sur la cinématique et sur la dynamique du système.

- méthode de *steering*
- méthode de validation de trajectoire

*legged multi-contact locomotion*

# Etat de l'art

## Multi-contact planning:

- Calculer la trajectoire
- Prévoir une séquence de configurations en équilibre sur la trajectoire

Solution via problème d'optimisation (on améliore une estimation mais risque de minimum local) [10][ 11][ 12]

Solution via sampling based methods (risque d'explosion du temps de calcul) et les méthodes existantes ont besoin que tous les points de contact soient en équilibre statique, rendant les mouvements dynamiques impossibles [5][13][14][15]



# Etat de l'art

## Kinodynamic planning:

Besoin de contrôler la vitesse et l'accélération dans le système

largement utilisé dans le control de bras manipulateur [8][16][17]

problème de complexité dans le cas de *legged multi-contact locomotion*

- réduction de la dimensionnalité du problème [18] (non effectuée dans ce contexte)
- contraintes dynamiques → besoin de gérer des bornes d'accélération variables

# Contribution

## Définition du problème et approche utilisée

Approche basée sur une formulation efficiente de la dynamique des robots à pattes

Un état du système  $S$  est défini tel que  $S = \langle \mathbf{X}, \mathbf{P}, \mathbf{N}, \mathbf{q} \rangle$  (1.0)

où  $\mathbf{X} = \langle \mathbf{c}, \dot{\mathbf{c}}, \ddot{\mathbf{c}} \rangle$  (1.1) la position, la vitesse et l'accélération du COM

$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \dots \mathbf{p}_k]$  (1.2) les positions des  $k$  points de contact

$\mathbf{N} = [\mathbf{n}_1 \dots \mathbf{n}_k]$  (1.3) les normales aux points de contact

$\mathbf{q} \in SE(3) \times \mathbb{R}^n$  (1.4) la configuration du robot où  $n$  est le nombre de DOF

# Contribution

## Vers une nouvelle *steering method*

- A chaque étape de l'algorithme de planification, *steering method* [23] définie comme suit appliquée aux états initiale et finale  $S_0 = \langle \mathbf{X}_0, \mathbf{P}_0, \mathbf{N}_0, \mathbf{Q}_0 \rangle$  et  $S_1 = \langle \mathbf{X}_1, \mathbf{P}_1, \mathbf{N}_1, \mathbf{Q}_1 \rangle$  et retourne une trajectoire optimale en temps

$$\mathbf{X} : t \in [0, t_f] \mapsto \langle \mathbf{c}(t), \dot{\mathbf{c}}(t), \ddot{\mathbf{c}}(t) \rangle \quad (2)$$

- $\mathbf{X}'(t)$  représente la portion de trajectoire réalisable

$$\mathbf{X}' : t \in [0, t'_f \leq t_f] \mapsto \mathbf{X}(t) \quad (3)$$

# Contribution

## Vers une nouvelle *steering method*

- utilisation d'un DIMT ou *Double Minimum Integration Time* à partir de bornes symétriques d'accélérations et de vitesses définies par l'utilisateur

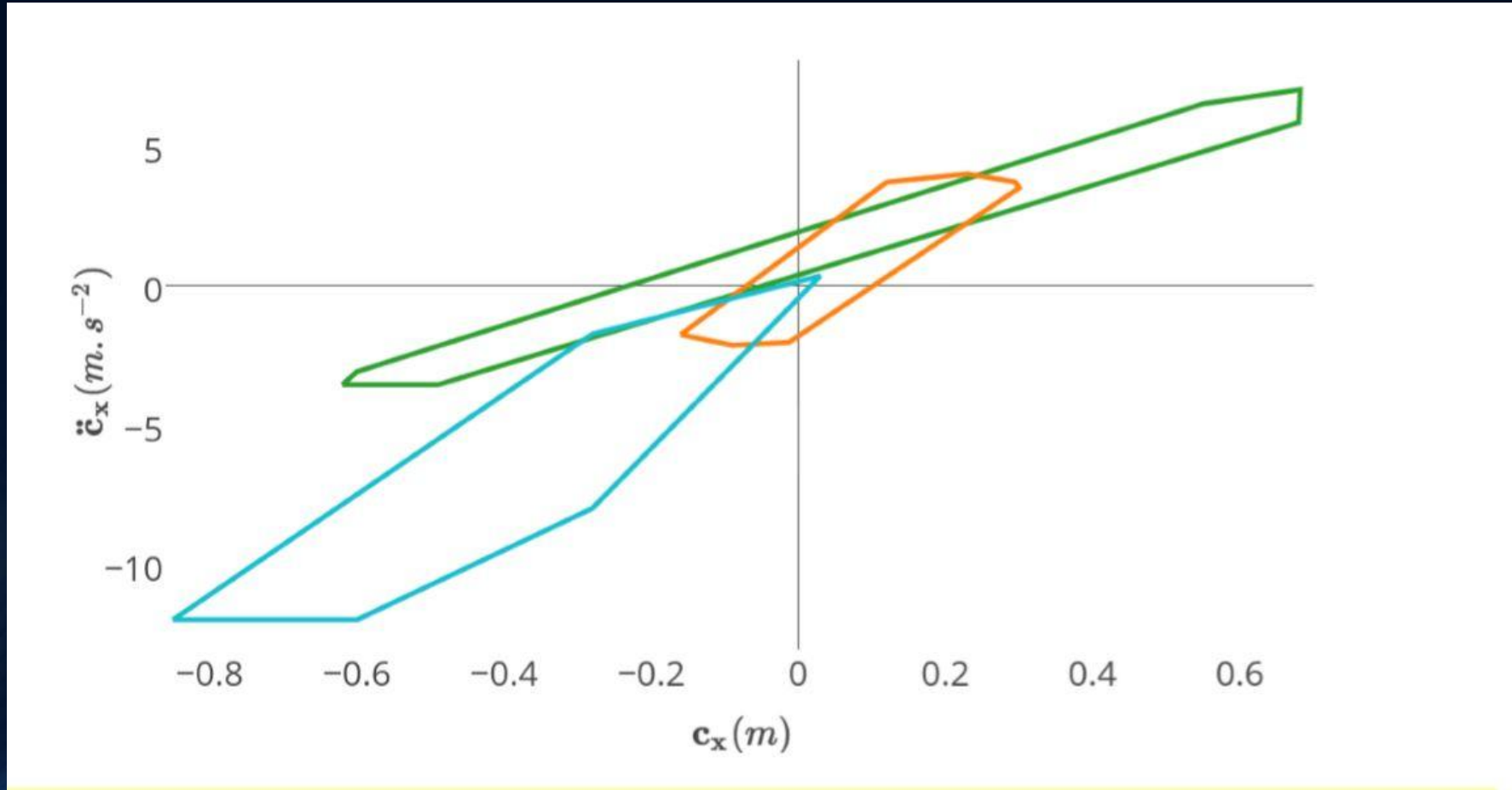
$$\begin{aligned} -\dot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}}^{max} &\leq \dot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}} \leq \dot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}}^{max} \\ -\ddot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}}^{max} &\leq \ddot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}} \leq \ddot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}}^{max} \end{aligned} \quad (4)$$

- pour le calcul d'une trajectoire reliant deux états consécutifs, sans regarder les contraintes de collision.
- principal problème : pour un robot à pattes, ces contraintes ne sont ni symétriques, ni constantes au cours du déplacement.



# Contribution

Exemple d'une contrainte dépendantes de l'état du robot HRP-2



# Contribution

## Une extension du test d'équilibre statique proposé dans des cas dynamiques

- Pour remédier à cela, phase de validation de trajectoire réalisée en vérifiant l'équilibre dynamique et les contraintes de non-collision le long de la trajectoire
- En se basant sur les équations de Newton-Euler, on obtient la relation (5.1) ci-dessous

$$\underbrace{m \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 \\ \hat{\mathbf{c}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \ddot{\mathbf{c}} + \underbrace{m \begin{bmatrix} -\mathbf{g} \\ \mathbf{c} \times -\mathbf{g} \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \dots & \mathbf{I}_3 \\ \hat{\mathbf{p}}_1 & \dots & \hat{\mathbf{p}}_k \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}} \mathbf{V} \boldsymbol{\beta}$$

(5.1)

$$\begin{aligned} &\text{find } \boldsymbol{\beta} \\ &\text{s.t. } \mathbf{G}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{H}\ddot{\mathbf{c}} + \mathbf{h} \\ &\quad \boldsymbol{\beta} \geq 0 \end{aligned}$$

(5.2)

- Existence d'une solution au LP formulé (5.2) ci-dessus -> robot en équilibre dynamique

# Contribution

## Un LP pour déterminer des bornes d'accélération du robot

- DIMT utilisé en amont pour calculer des bornes réalistes sur les accélérations en  $S_0$ .
- étape augmentant significativement le taux de succès de la steering method.
- Initialisation du DIMT permettant d'obtenir une trajectoire à accélérations constantes:

$$-\ddot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}}^{\infty} \leq \ddot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}} \leq \ddot{\mathbf{c}}_{\{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}\}}^{\infty} \quad (6.1)$$

- calcul d'une valeur d'accélération et direction d'accélération pour chaque phase du mouvement.

$$\ddot{\mathbf{c}}^{max} = \alpha^* \mathbf{a} \quad (6.2)$$

# Contribution

## Un LP pour déterminer des bornes d'accélération du robot

- utilisation l'accélération trouvée en tant que bornes d'une deuxième DIMT afin de trouve une autre accélération dont on vérifiera la colinéarité avec la précédente.

$$-(\alpha^* \mathbf{a})_{\{x,y,z\}} \leq \ddot{\mathbf{c}}_{\{x,y,z\}} \leq (\alpha^* \mathbf{a})_{\{x,y,z\}} \quad (7)$$

- Si elle est colinéaire à la précédente, les bornes sont exactes et la trajectoire est dynamiquement valide dans le voisinage de l'état de départ.

$$\ddot{\mathbf{c}}^{max} = \mathbf{a} \alpha_0^* \quad (8)$$

- Un LP (9.3) permet alors de trouver l'accélération maximale réalisable selon l'axe  $\mathbf{a}$



# Contribution

Un LP pour déterminer des bornes d'accélération du robot

$$\begin{array}{ll} \text{find } \boldsymbol{\beta} \\ \text{s.t. } \mathbf{G}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{H}\ddot{\mathbf{c}} + \mathbf{h} \\ \boldsymbol{\beta} \geq 0 \end{array} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{G}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{H}\alpha\mathbf{a} + \mathbf{h} \quad (9.1)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} & -(\mathbf{H}\mathbf{a}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} \\ \alpha \end{bmatrix} = \mathbf{h} \quad (9.2)$$

$$\begin{array}{ll} \text{find } \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} \\ \alpha \end{bmatrix} \\ \text{min } -\alpha \\ \text{s. t. } \begin{bmatrix} \mathbf{G} & -(\mathbf{H}\mathbf{a}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} \\ \alpha \end{bmatrix} = \mathbf{h} \\ \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} \\ \alpha \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \end{array} \quad (9.3)$$

- (9.3) critere efficace permettant de determiner équilibre dynamique
- Partie valide de la trajectoire est obtenue avec la validation du chemin par le même type de formulation

# Résultats: RB-RRT



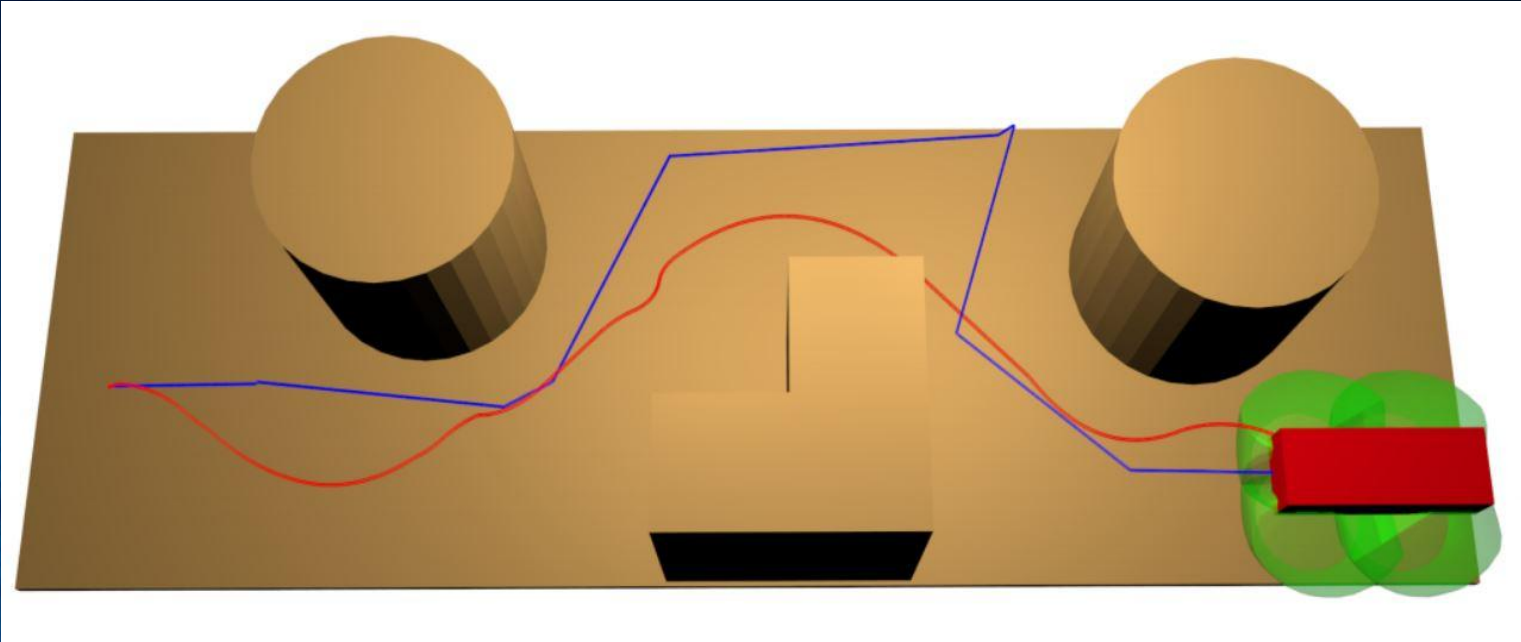
HyQ représentation simplifiée pour la phase 1 .En vert, l'espace atteignable par les effecteurs. En rouge, l'espace ne devant pas subir de collision

phase 1: planification de trajectoire (et non de chemin)

phase 2: génération de la séquence des points de contacts (pas de contrainte d'équilibre statique)

phase 3: interpolation de la séquence pour un mouvement continu

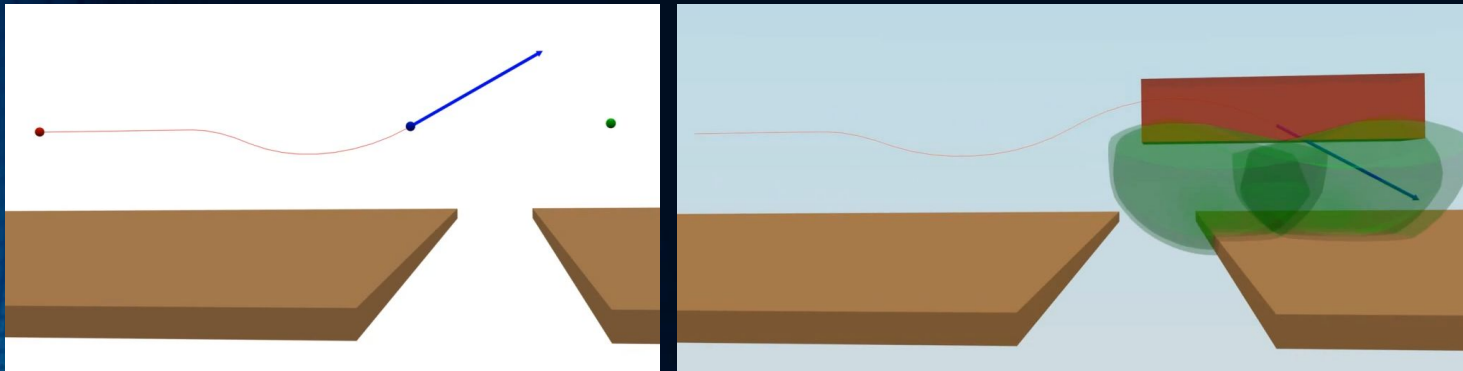
# Résultats: quasi-statics vs kynodynamic



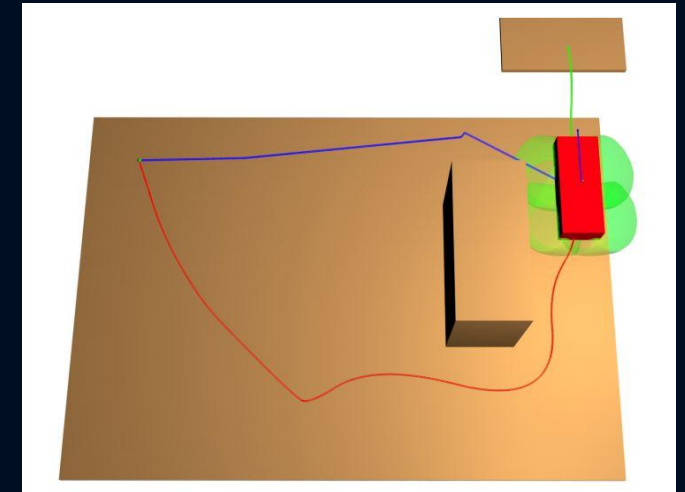
Les trajectoires calculées par la version kynodynamique du planificateur, en rouge, est visuellement plus intéressant que sa version quasi-statique, en bleue

# Résultats: Saut

contrainte d'équilibre statique supprimée: mouvements dynamiques possibles



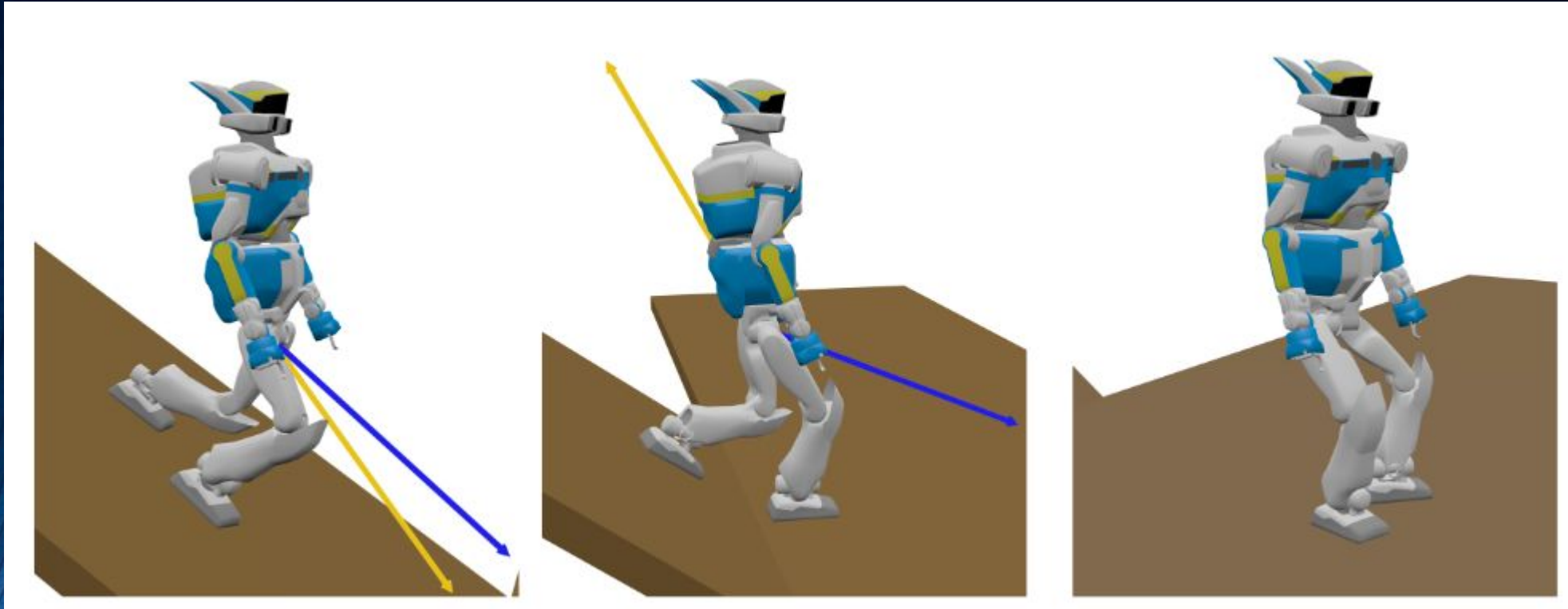
- calcul du mouvement balistique et de la vitesse nécessaire pour décoller [30]
- cet état est ensuite donné comme objectif au planificateur [30]



Trajectoire de la méthode quasi-statique en bleue et celle de leur planificateur en rouge (échappe un minimum local)



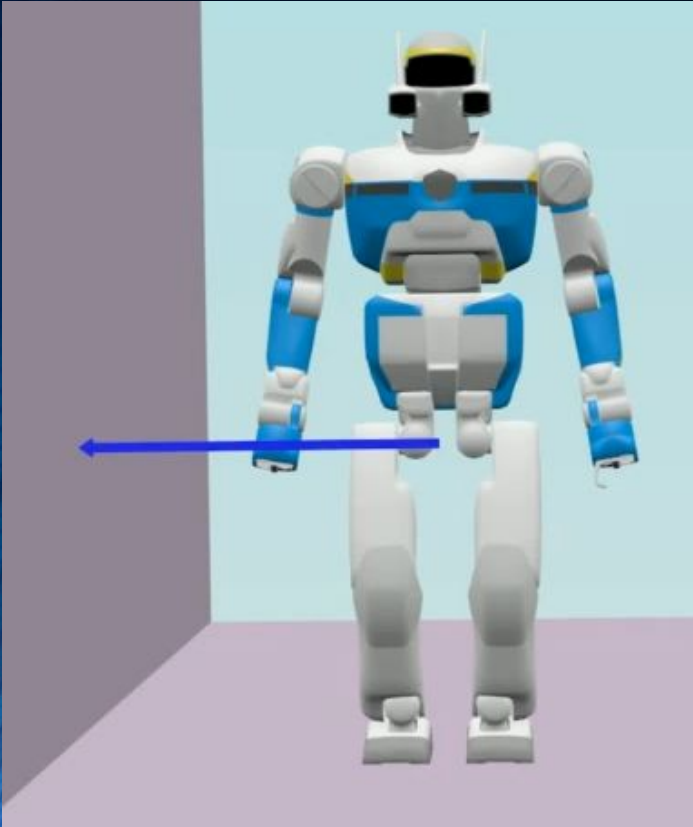
# Résultats: Descentes de pentes



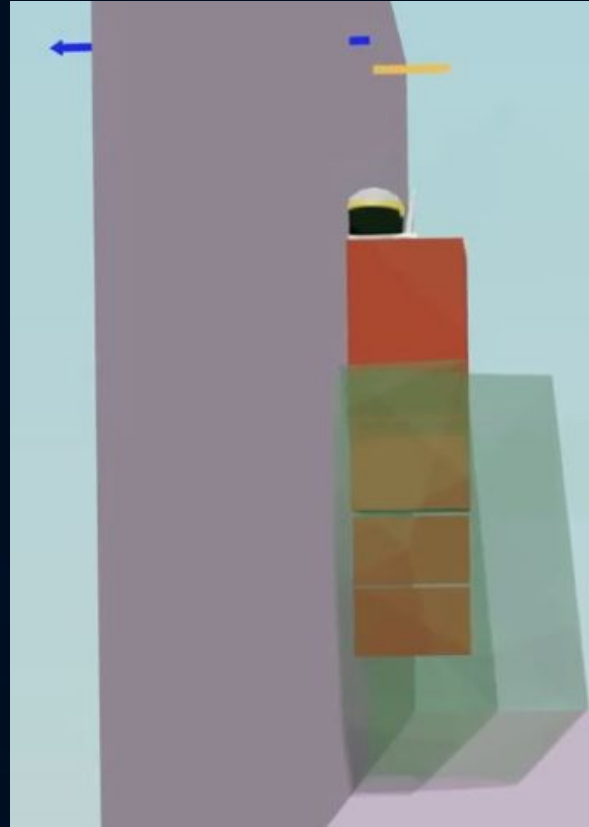
Accélère  
pendant la  
descente et  
décélère sur  
le sol plat

HRP-2 descendant une pente à  $38^\circ$ .  
en bleue la vitesse, en jaune l'accélération

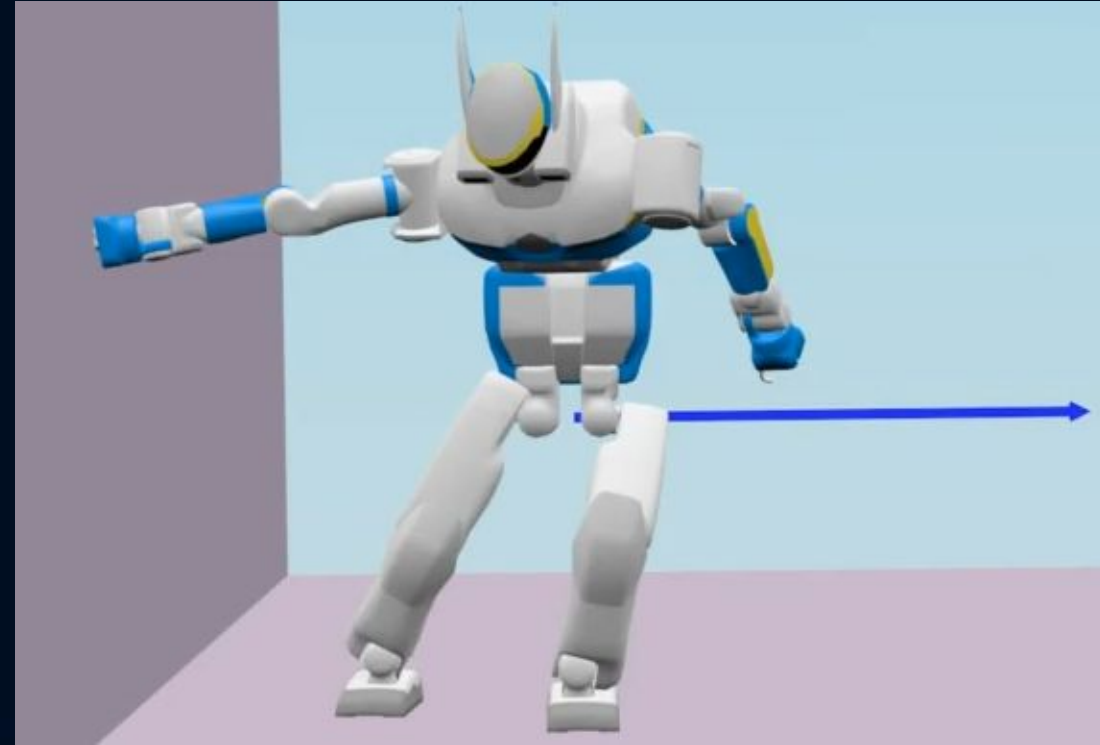
# Résultats: Rétablissement après poussée



HRP-2 subit une force de  
1,5 m/s [30]



Pas de solutions sans  
les bras [30]



bornes d'accélération trouvés  
permettant d'éviter la collision [30]

# Résultats: Performances

	Path Planning				Contact Generation		Total
Scenario	Valid traj. (%)	Valid dir. (%)	num. nodes	time (% tot. time)	time (% tot. time)	success (%)	time (s)
Slalom (HyQ)	95.72 %	65.6 %	491	69.56 %	30.43 %	90 %	85.55
Local minima (HyQ)	95.25 %	69.8 %	315	69.14 %	30.86%	75%	38.31
Steep slope (25°) (HRP-2)	82.4 %	58.3 %	3895	77.36 %	22.63%	85 %	165.61
Steep slope (38°) (HRP-2)	80.75 %	56.5 %	5533	87.35 %	12.64%	90 %	679.73
Push recovery (HRP-2)	100 %	100 %	2	0.08 %	99.92%	100 %	5.78
Inclined planes (HyQ)	100 %	100 %	2	0.20 %	99.80%	100 %	2.55

Tableau I :  
Temps de calculs et taux de succès par scénarios moyennés sur 20 essais

Scenario : Slalom (HyQ)			
acc. bounds	time (s)	valid trajectories	solution length (s)
LP (ours)	59.5	95.7%	12.2
6	time-out	0.8%	X
4	913.3	69.1%	13.4
2	109.7	90.3 %	22.3

Scenario : Slope (38°) (HRP-2)			
acc. bounds	time (s)	valid trajectories	solution length (s)
LP (ours)	593.7	80.75 %	11.64
6	time-out	0.2%	X
4	10992.6	7.6%	16.98
2	time-out	8.8%	X

Tableau II : Comparaison des performances de planification obtenues avec des bornes sur l'accélération définies par l'utilisateur

# Conclusion

## Deux contributions théoriques et une concrète :

- Une extension du test d'équilibre statique proposé pour des cas dynamiques et qui, dans notre cas, sont plus véloce que des approches précédentes
- Un programme linéaire efficient permettant de déterminer les intervalles d'accélérations sur le COM du robot
- Un des premiers planificateurs kynodynamiques capable de synthétiser des mouvements multi-contacts réellement dynamiques pour robots à pattes



# Conclusion

## Travaux futures :

- Méthodes d'optimisation de trajectoires
- Optimisation du temps de calculs
- Algorithme direct pour les trajectoires calculées par leur planificateur

## Avis personnels sur l'article :

- Absence de comparaisons des résultats obtenus avec ceux de travaux similaires
- Nouveauté de la méthode proposée dans l'article



# Merci de votre attention

DES QUESTIONS ?

# Références

- [1] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," in IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) , vol. 2, 2003.
- [2] C. G. Atkeson, B. P. W. Babu, N. Banerjee, D. Berenson, C. P. Bove, X. Cui, M. DeDonato, R. Du, S. Feng, P. Franklin, M. Gennert, J. P. Graft, P. He, A. Jaeger, K. K. J. Kim, L. Li, X. L. C. Liu, T. Padir, F. Polido, G. G. Tighe, and X. Xinjilefu, "What happened at the darpa robotics challenge, and why?" Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, Tech. Rep., 2015.
- [3] J. Pratt, J. Carff, S. Drakunov, and A. Goswami, "Capture Point: A Step toward Humanoid Push Recovery," IEEE-RAS Inter. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids) , 2006.
- [4] Z. Qiu, A. Escande, A. Micaelli, and T. Robert, "Human motions analysis and simulation based on a general criterion of stability," in Inter. Symposium on Digital Human Modeling , 2011.
- [5] A. Escande, A. Kheddar, S. Miossec, and S. Garsault, "Planning Support Contact-Points for Acyclic Motions and Experiments on HRP- 2," in Springer Tracts in Advanced Robot (ISER) , O. Khatib, V. Kumar, and G. J. Pappas, Eds., vol. 54, 2008.
- [6] T. Bretl, "Motion planning of multi-limbed robots subject to equilibrium constraints: The free-climbing robot problem," The Inter. Journal of Robotics Research , vol. 25, no. 4, Apr. 2006.
- [7] S. Tonneau, N. Mansard, C. Park, D. Manocha, F. Multon, and J. Pettr' e, "A reachability-based planner for sequences of acyclic contacts in cluttered environments," in Int. Symp. Robotics Research (ISRR) , Sestri Levante, Italy, 2015.
- [8] T. Kunz and M. Stilman, "Probabilistically complete kinodynamic planning for robot manipulators with acceleration limits," in IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) , 2014.
- [9] T. Bretl, S. M. Rock, J.-C. Latombe, B. Kennedy, and H. Aghazar-ian, "Free-climbing with a multi-use robot," in Inter. Symposium on Experimental Robotic (ISER) , 2004.
- [10] I. Mordatch, E. Todorov, and Z. Popovi' c, "Discovery of complex behaviors through contact-invariant optimization," ACM Trans. on Graphics , vol. 31, no. 4, pp. 43:1–43:8, 2012.
- [11] A. W. Winkler, F. Farshidian, M. Neunert, D. Pardo, and J. Buchli, "Online walking motion and foothold optimization for quadruped locomotion," in IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) , May 2017.

# Références

- [12] M. Posa, S. Kuindersma, and R. Tedrake, "Optimization and stabilization of trajectories for constrained dynamical systems," in 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2016, pp. 1366–1373.
- [13] K. Bouyarmane, A. Escande, F. Lamiroux, and A. Kheddar, "Potential field guide for humanoid multicontacts acyclic motion planning," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Japan, 2009.
- [14] J. Carpentier, S. Tonneau, M. Naveau, O. Stasse, and N. Mansard, "A versatile and efficient pattern generator for generalized legged locomotion," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden, May 2016.
- [15] M. X. Grey, A. D. Ames, and C. K. Liu, "Footstep and motion planning in semi-unstructured environments using randomized possibility graphs," in IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2017.
- [16] T. Kröger, A. Tomiczek, and F. M. Wahl, "Towards on-line trajectory computation," in IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2006.
- [17] K. Hauser and V. Ng-Thow-Hing, "Fast smoothing of manipulator trajectories using optimal bounded-acceleration shortcuts," in IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), May 2010.
- [18] Q.-C. Pham, S. Caron, P. Lertkultanon, and Y. Nakamura, "Admissible velocity propagation: Beyond quasi-static path planning for high-dimensional robots," Inter. Journal of Robotics Research, 2016, first published November 1, 2016.
- [19] A. Del Prete, S. Tonneau, and N. Mansard, "Fast Algorithms to Test Robust Static Equilibrium for Legged Robots," in IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden, 2016.
- [20] S. Noda, M. Murooka, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, K. Okada, and M. Inaba, "Generating whole-body motion keep away from joint torque, contact force, contact moment limitations enabling steep climbing with a real humanoid robot," in IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), May 2014.



# Références

- [21] Y. Zheng, M. C. Lin, D. Manocha, A. H. Adiwahono, and C. M. Chew, "A walking pattern generator for biped robots on uneven terrains," in 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oct 2010, pp. 4483–4488.
- [22] J. Kuffner Jr and S. LaValle, "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning," in IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), vol. 2, no. April, 2000.
- [23] S. M. LaValle, Planning Algorithms. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2006.
- [24] J. Mirabel, S. Tonneau, P. Fernbach, A. K. Seppala, M. Campana, N. Mansard, and F. Lamiroux, "HPP: A new software for constrained motion planning," in IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Oct 2016.
- [25] S. Caron, Q.-C. Pham, and Y. Nakamura, "Leveraging Cone Double Description for Multi-contact Stability of Humanoids with Applications to Statics and Dynamics," in Robotics, Science and Systems (RSS), 2015.
- [26] S. Tonneau, A. D. Prete, J. Pettré, C. Park, D. Manocha, and N. Mansard, "An efficient acyclic contact planner for multiped robots," in Technical report, 2016.
- [27] M. Campana, P. Fernbach, S. Tonneau, M. Taïx, and J.-P. Laumond, "Ballistic motion planning for jumping superheroes," in Inter. Conf. on Motion in Games (MIG). San Francisco, California: ACM, 2016, pp. 133–138.
- [28] R. Deits and R. Tedrake, "Footstep planning on uneven terrain with mixed-integer convex optimization," in IEEE-RAS Inter. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids), Madrid, Spain, 2014.
- [29] S. Karaman and E. Frazzoli, "Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning," Int. Journal of Robotics Research, vol. 30, pp. 846–894, 2011.
- [30] Video : kinodynamic steering method for legged multicontact locomotion  
[https://www.researchgate.net/publication/318702205\\_Video\\_kinodynamic\\_steering\\_method\\_for\\_legged\\_multicontact\\_locomotion](https://www.researchgate.net/publication/318702205_Video_kinodynamic_steering_method_for_legged_multicontact_locomotion)