



Introduction à l'haptique et à la perception du mouvement

Cours Master

Fabien Danieau

19 Octobre 2021

InterDigital - Immersive Media Lab
fabien.danieau@interdigital.com

Sommaire

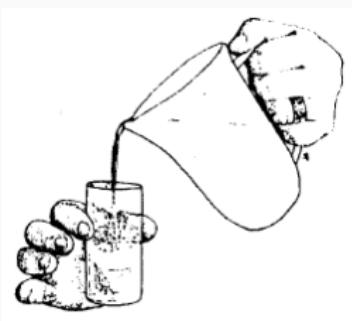
Sommaire

1. Le sens Haptique
2. La perception Tactile
3. La perception Kinesthésique
4. Le sens du Mouvement
5. Conclusion

Le sens Haptique

Définition

- Science du toucher
- Vient du grec *haptesthai* : attraper, toucher
- Englobe les phénomènes **tactiles** et **kinesthésiques**
- Tactile
 - Texture
 - Vibration
 - Force de friction
 - Température
- Kinesthésie
 - Position
 - Mouvement
 - Force
 - Résistance



Exploration haptique

LATERAL MOTION /
TEXTURE



PRESSURE /
HARDNESS



STATIC CONTACT /
TEMPERATURE



UNSUPPORTED
HOLDING /
WEIGHT



ENCLOSURE /
GLOBAL SHAPE,
VOLUME



CONTOUR
FOLLOWING /
GLOBAL SHAPE,
EXACT SHAPE



FUNCTION TEST /
SPECIFIC
FUNCTION



PART MOTION TEST /
PART MOTION



Exemples d'applications



Figure 1 : Divertissement

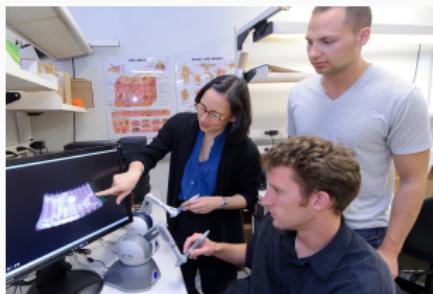


Figure 2 : Education



Figure 3 : Médical



Figure 4 : Téléopération

Flux de travail



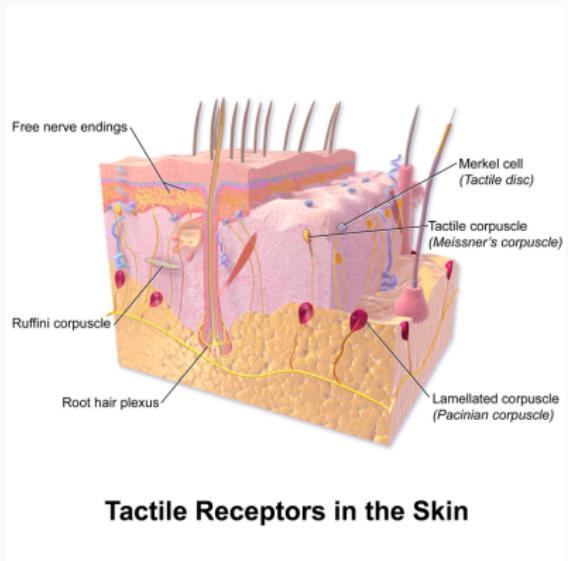
Figure 5 : Flux de travail pour l'interaction haptique

- Utilisateur : contrôle l'interface haptique et ressent le retour haptique
- Interface haptique : sert d'intermédiaire entre le monde réel et la simulation
- Algorithme de rendu haptique : calcul le retour haptique à rendre via l'interface haptique
- Simulation : représentation du monde virtuel ou distant

La perception Tactile

La perception tactile

- Perception provenant de la peau
- Mechanorecepteurs
 - Disques de Merkel
 - Corpuscules de Ruffini
 - Corpuscules de Pacini
 - Corpuscules de Meissner
 - Récepteurs du follicule pileux
 - Terminaisons nerveuses



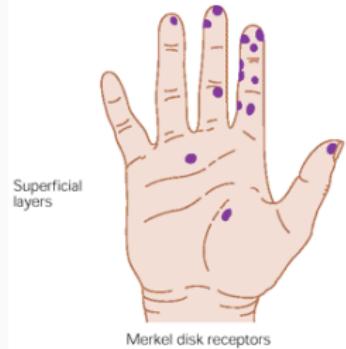
La perception tactile

Nom	Type	Fréquence du stimulus	Surface de réception	Rôle
Disques de Merkel	SA-I	0-10Hz	Restreint	Rebord, Pression
Corp. de Ruffini	SA-II	0-10Hz	Large	Etirement de la peau
Corp. de Meissner	FA-I	20-50Hz	Restreint	Pression
Corp. de Pacini	FA-II	100-300Hz	Large	Pression profonde, vibration

Table 1 : Caractéristiques des méchanorécepteurs

La perception tactile

A Slowly adapting mechanoreceptors



Superficial layers

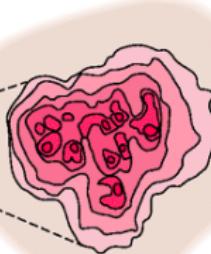
Merkel disk receptors

B Rapidly adapting mechanoreceptors

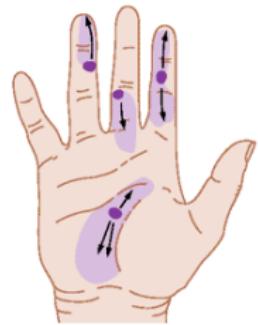


Meissner's corpuscles

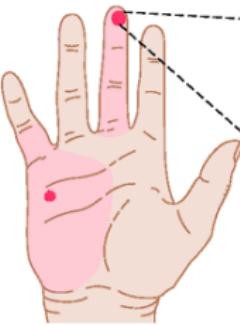
C Receptive field architecture



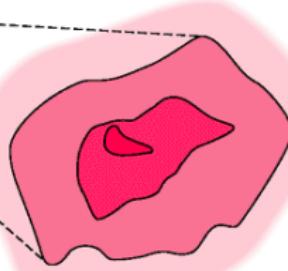
Deep layers



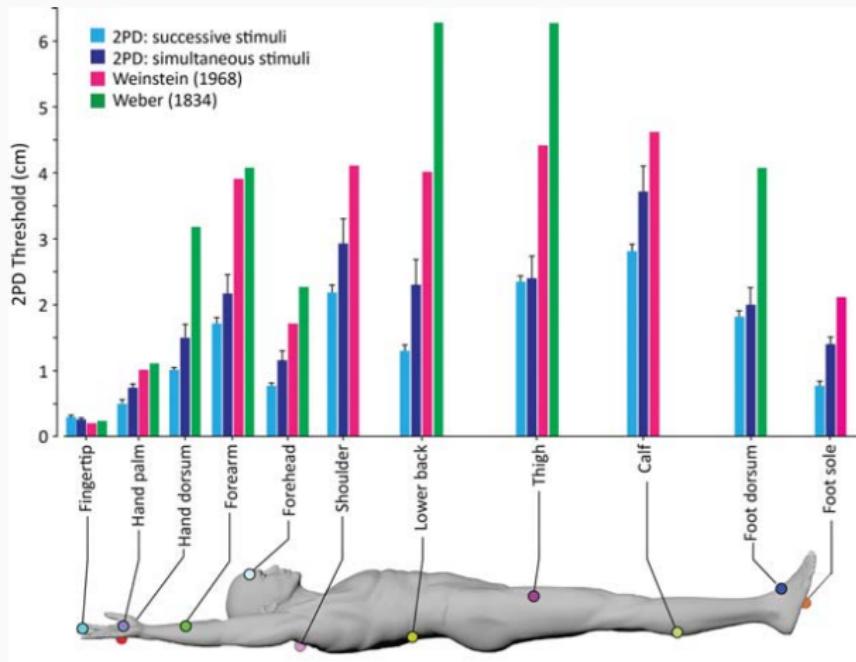
Ruffini endings



Pacinian corpuscles

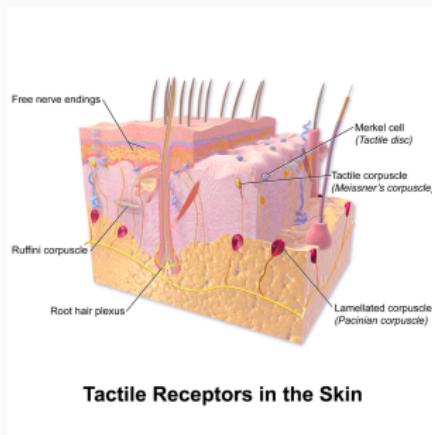


La perception tactile



La perception tactile - thermique

- Récepteurs thermiques identifiés récemment (Nobel 2021)
- Les récepteurs mesurent les variations de températures
 - récepteurs au chaud (entre 30 et 46 °C)
 - récepteurs au froid (entre 10 et 35 °C)



Illusions tactiles

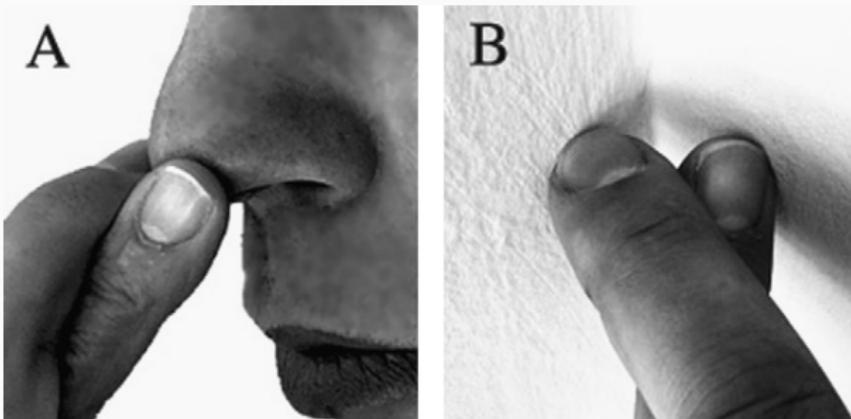


Figure 6 : Illusion d'Aristote. Lorsque les doigts sont croisés, deux surfaces sont perçues au lieu d'une (A). L'illusion inverse consiste à ne ressentir qu'une surface au lieu de deux (B).

Illusions tactiles

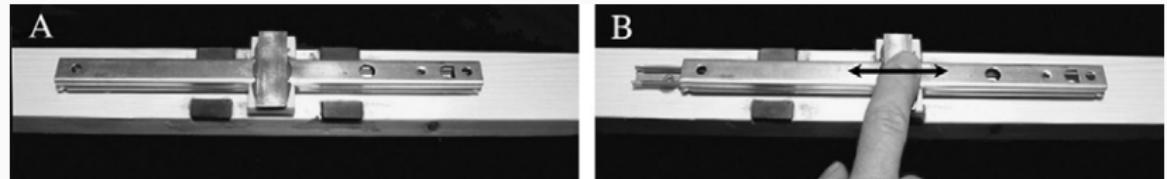


Figure 7 : Illusion de bosses et creux. Réalisée avec une glissière et des aimants. Les aimants vont réduire la vitesse de déplacement de la glissière, induisant une illusion de bosses et de creux.

Illusions tactiles

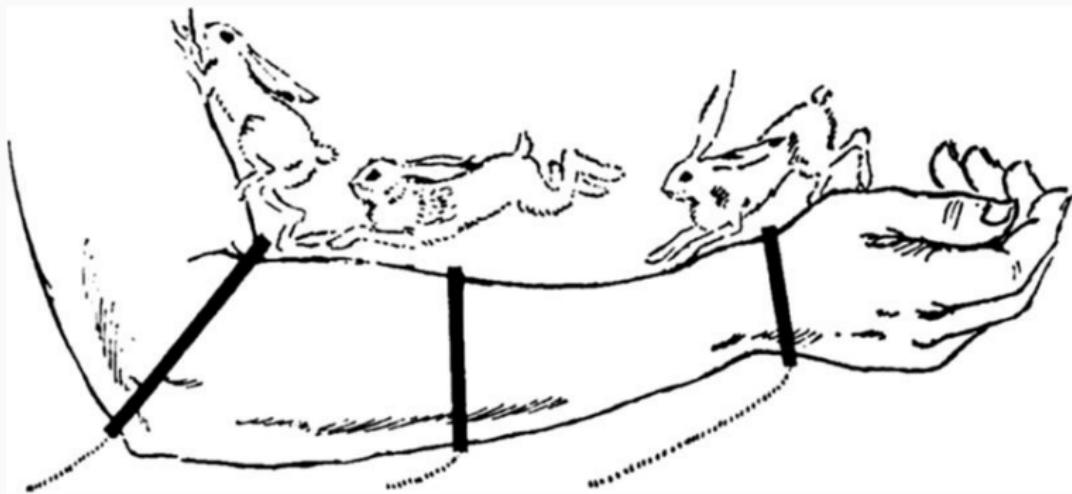


Figure 8 : "Cutaneous rabbit illusion". Lorsque 3 vibrations sont appliquées successivement sur la surface de la peau, seul un stimulus continu est ressenti.

Illusions tactiles



Figure 9 : Illusion du grill. Stimuli chauds (40°C) et froids (20°C) appliqués successivement sur la peau. Une sensation de brûlure apparaît.

Interfaces tactiles - Contact

- Vibreurs
- Solénoïdes



Figure 10 : ©Cybertouch.com

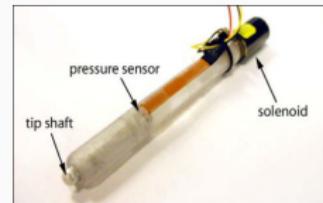


Figure 11 : [Lee et al., 2004]

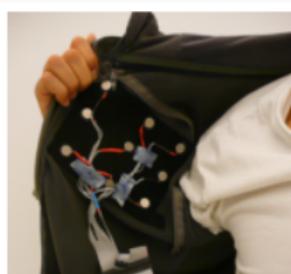


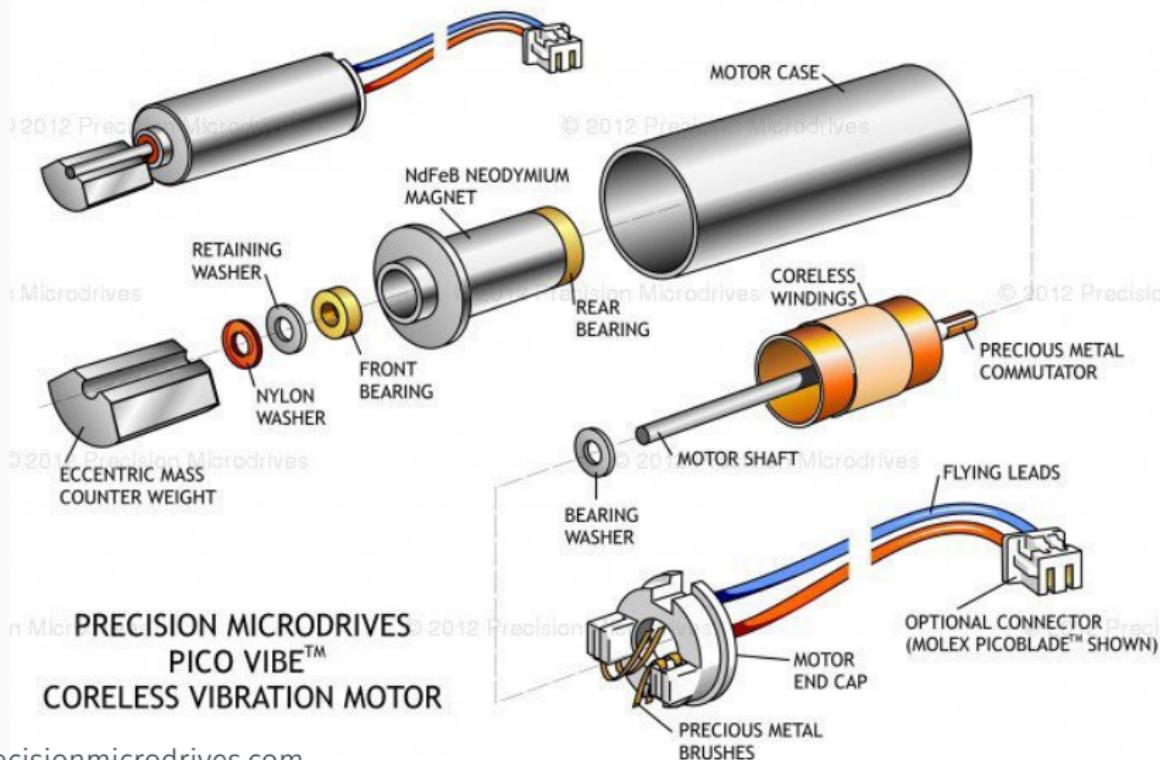
Figure 12 : [Abdur Rahman et al., 2010]

Moteur à masse excentrique (ERM)

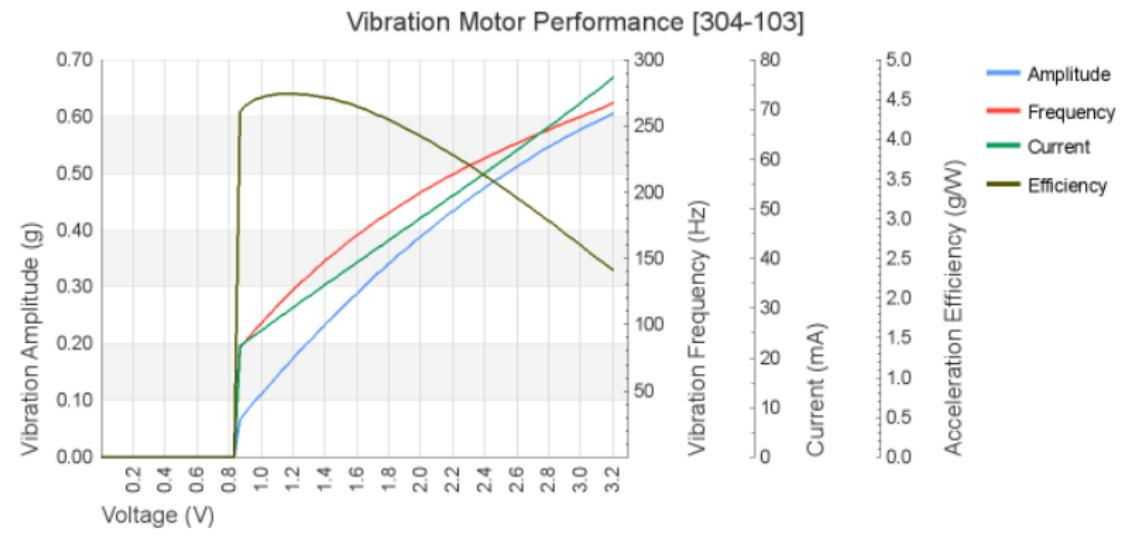
n Microdrives

© 2012 Precision Microdrives

© 2012 Precisi



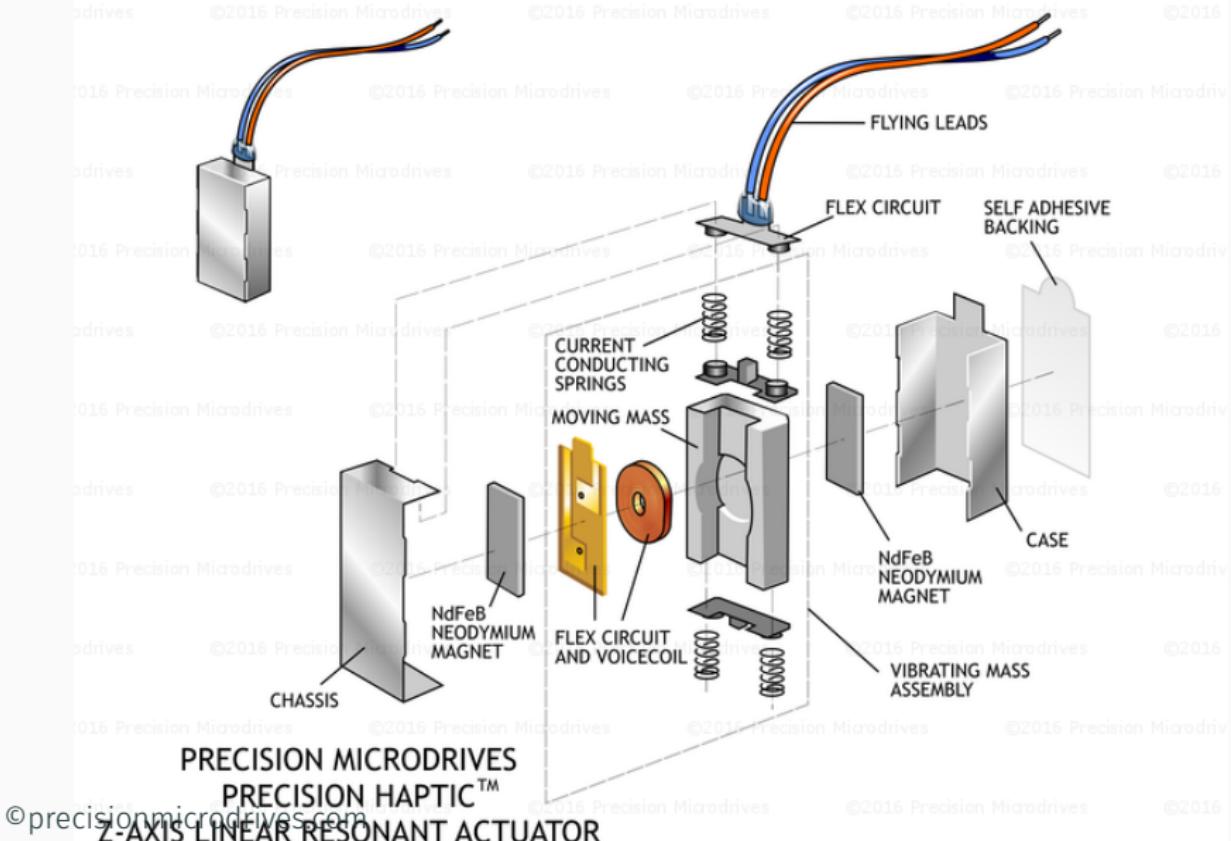
Moteur à masse excentrique (ERM)



Exemple : manette Xbox One



Moteur linéaire (LRA)

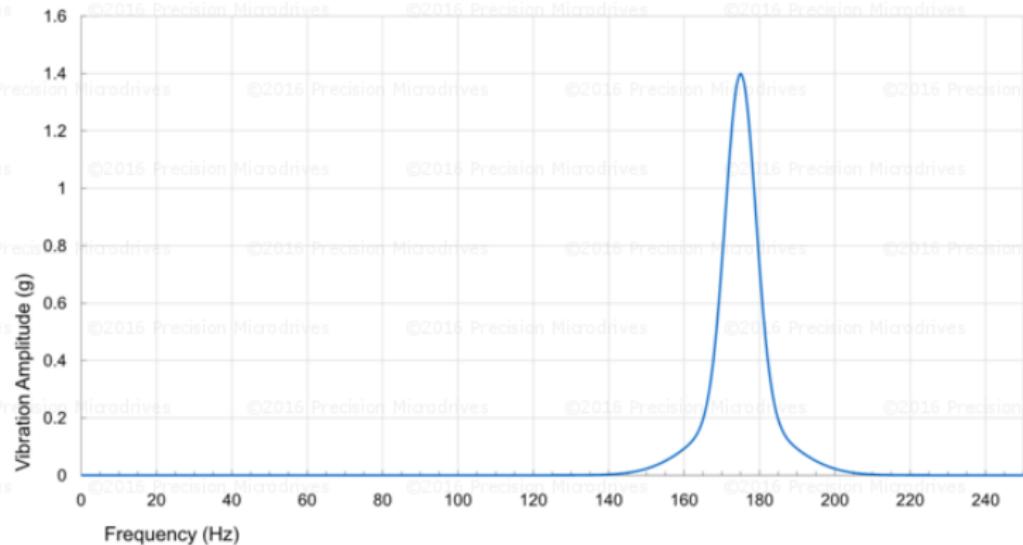


Moteur linéaire (LRA)

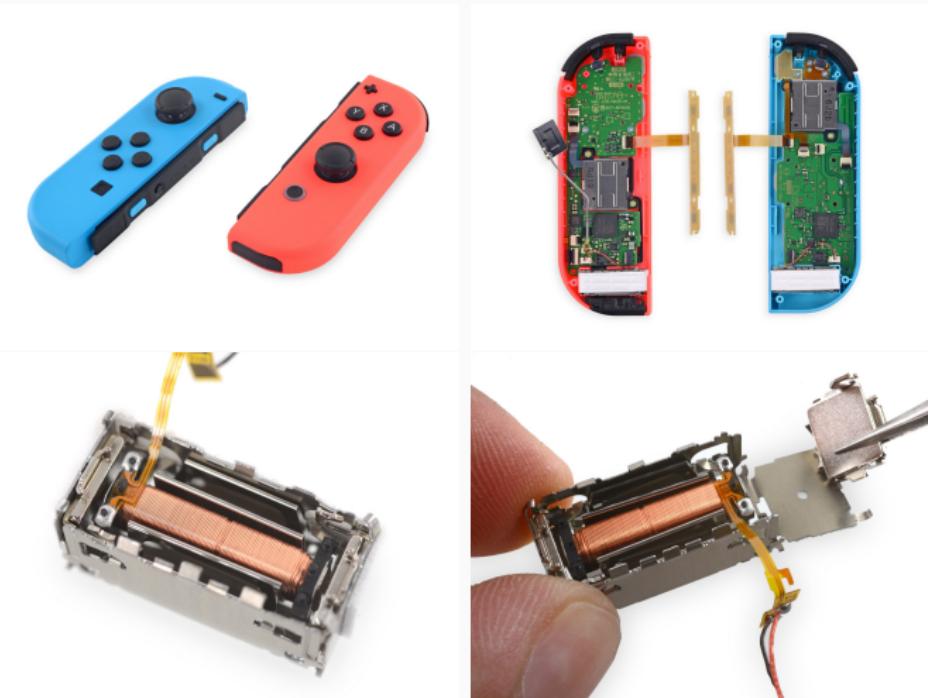
C10-100

Typical Resonator Frequency Response

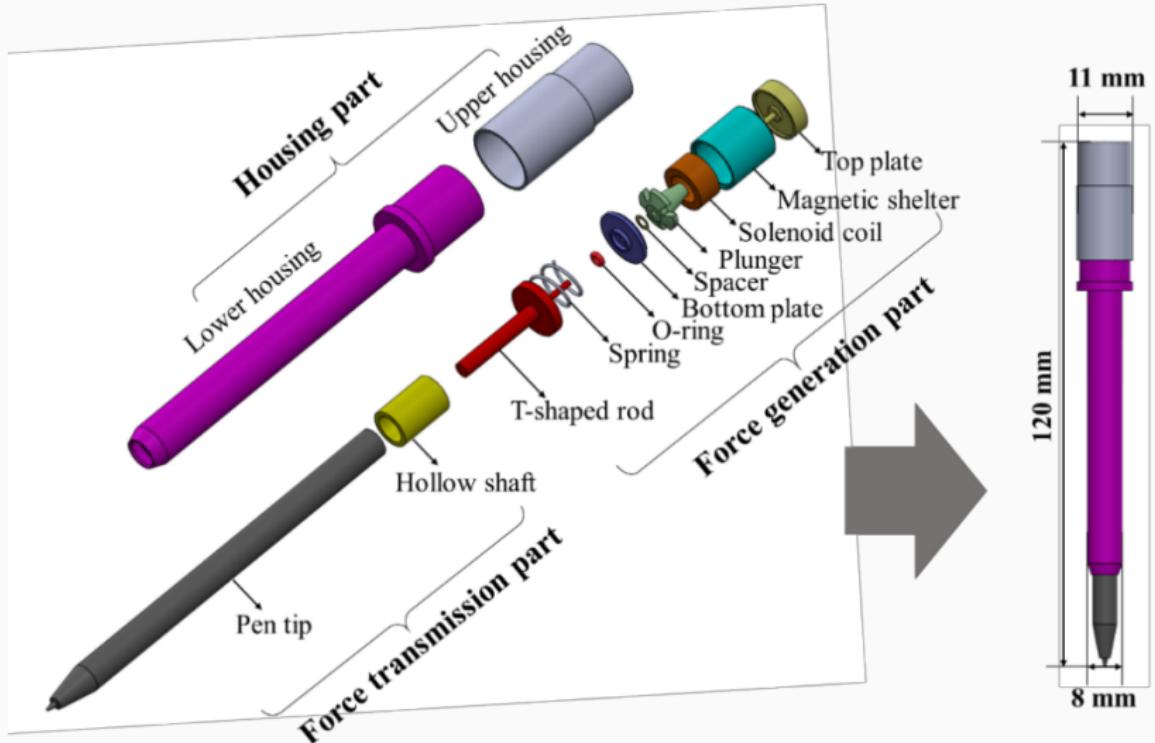
Resonator Frequency Response [C10-100]



Exemple : manette Switch



Interfaces tactiles - Contact



NormalTouch and TextureTouch

High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Virtual Reality Controllers

Hrvoje Benko, Christian Holz, Mike Sinclair, Eyal Ofek
Microsoft Research, 2016



Exemple : manette PS5



Interfaces tactiles - Texture

- Matrice de picots
- Actuateur piezo-electrique
- Vibration electrostatique

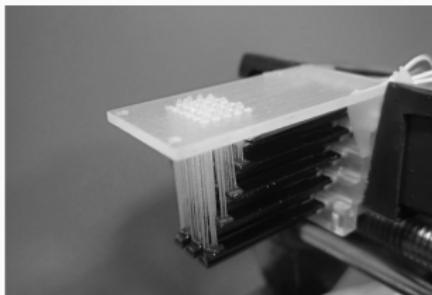


Figure 13 : [Yang and Kwon, 2008]

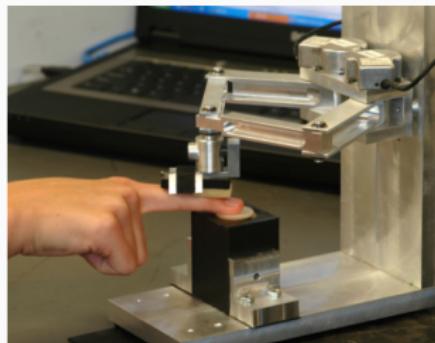


Figure 14 : [Winfield et al., 2007]

Interfaces tactiles - Texture



Interfaces tactiles - pression sans contact

- Ultrasonic transmitters array
- Projecteur de flux d'air

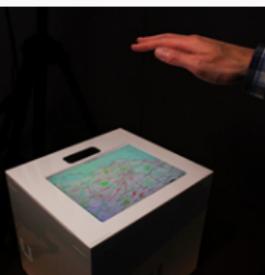
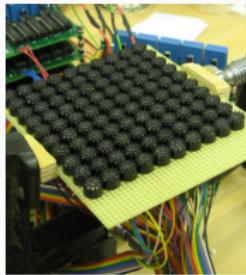


Figure 15 : [Alexander et al., 2011]

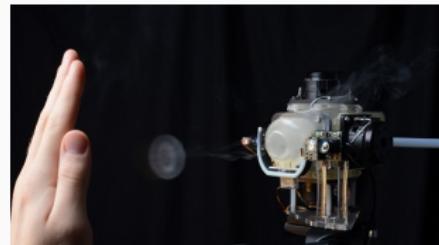
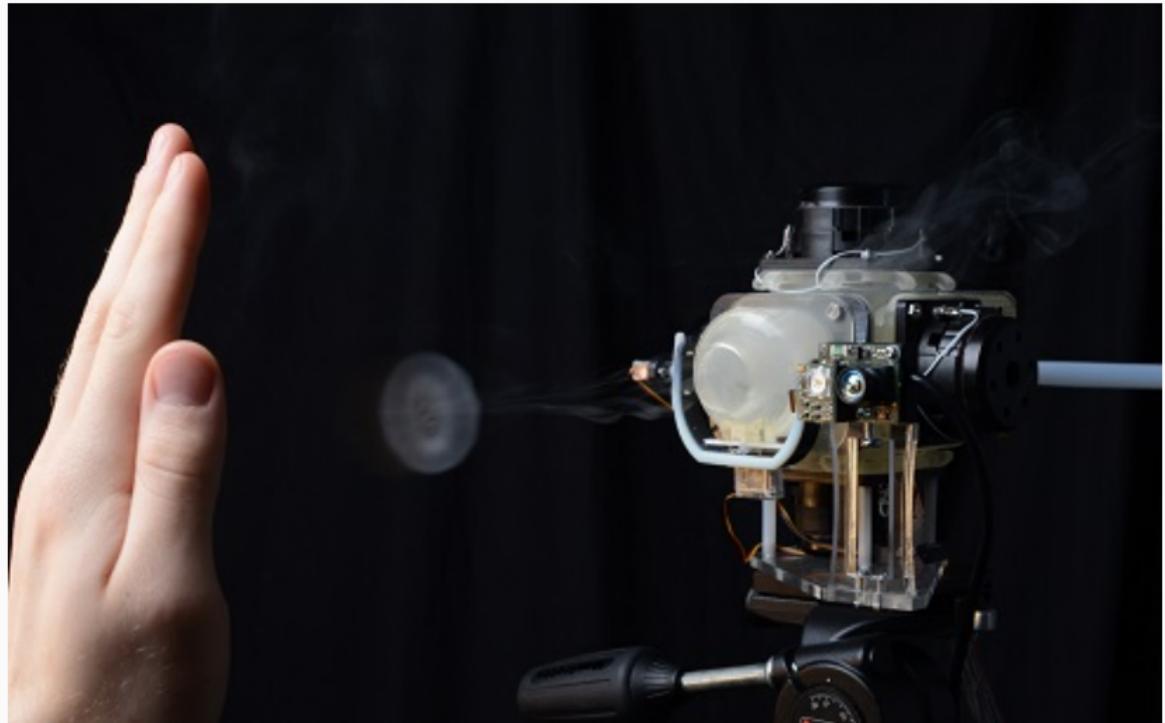


Figure 16 : [Sodhi et al., 2013]

Interfaces tactiles - Pression sans contact



[Sodhi et al., 2013]

Interfaces tactiles - thermique

- Ventilateur + source de chaleur
- Module Peltier

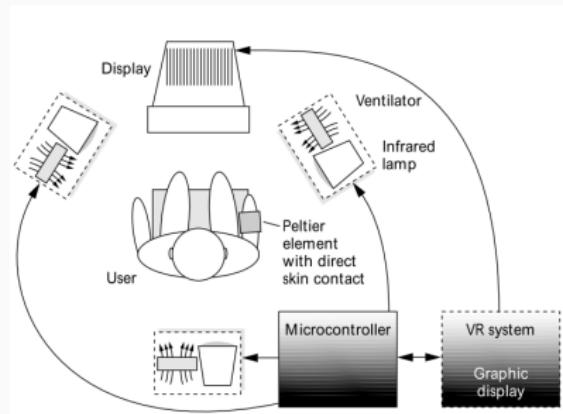


Figure 17 : [Dionisio, 1997]

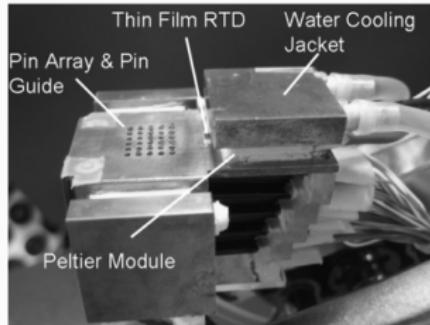
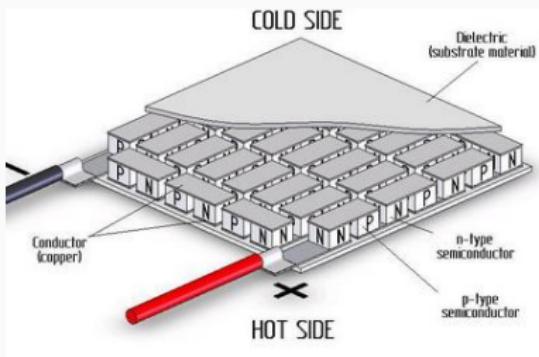
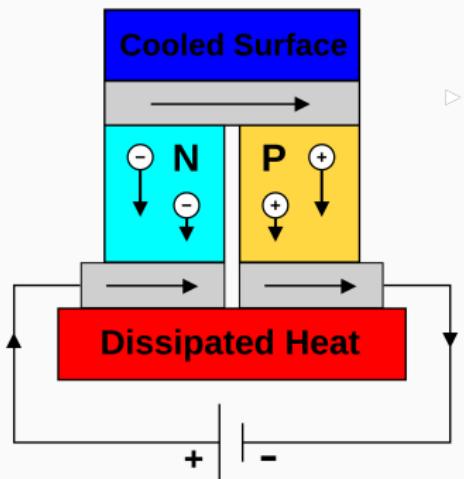


Figure 18 : [Yang and Kwon, 2008]

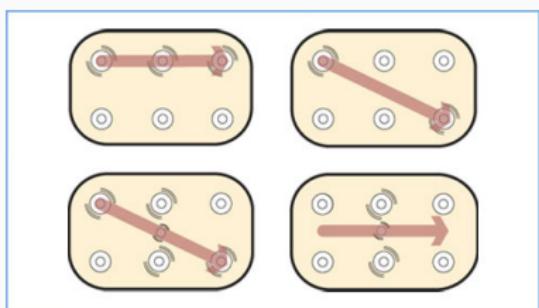
Effet Peltier

- Le passage du courant dans les semi-conducteurs N et P provoquent un flux thermique
- Découvert en 1834 par Jean-Charles Peltier



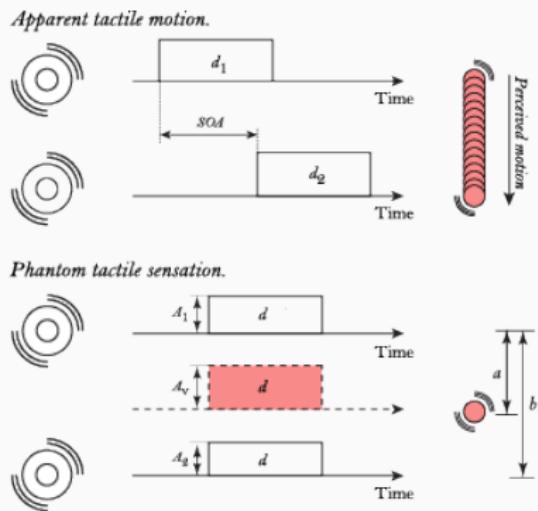
Rendu tactile

- Contrôle simple la plupart des cas (ex : 1 vibreur)
- Comment rendre un effet tactile continu dans l'espace avec un nombre limité de vibreurs ?
- Exemple : Tactile Brush Algorithm
[Israr and Poupyrev, 2011]

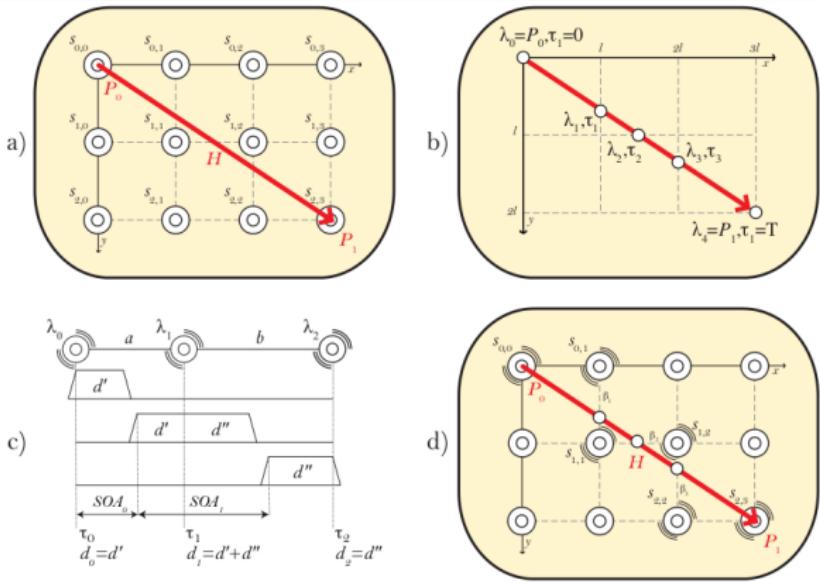
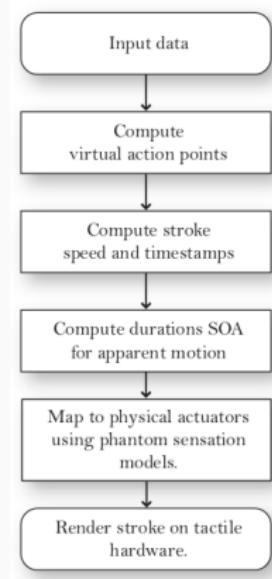


Rendu tactile - Tactile Brush Algorithm

- Basé sur 2 illusions
 - Apparent tactile motion
 - $SOA = 0.32d + 47.3$
 - Phantom tactile sensation
 - $A_1 = \sqrt{1 - \beta} \cdot A_v$
 - $A_2 = \sqrt{\beta} \cdot A_v$
 - $\beta = \frac{a}{b}$



Rendu tactile - Tactile Brush Algorithm

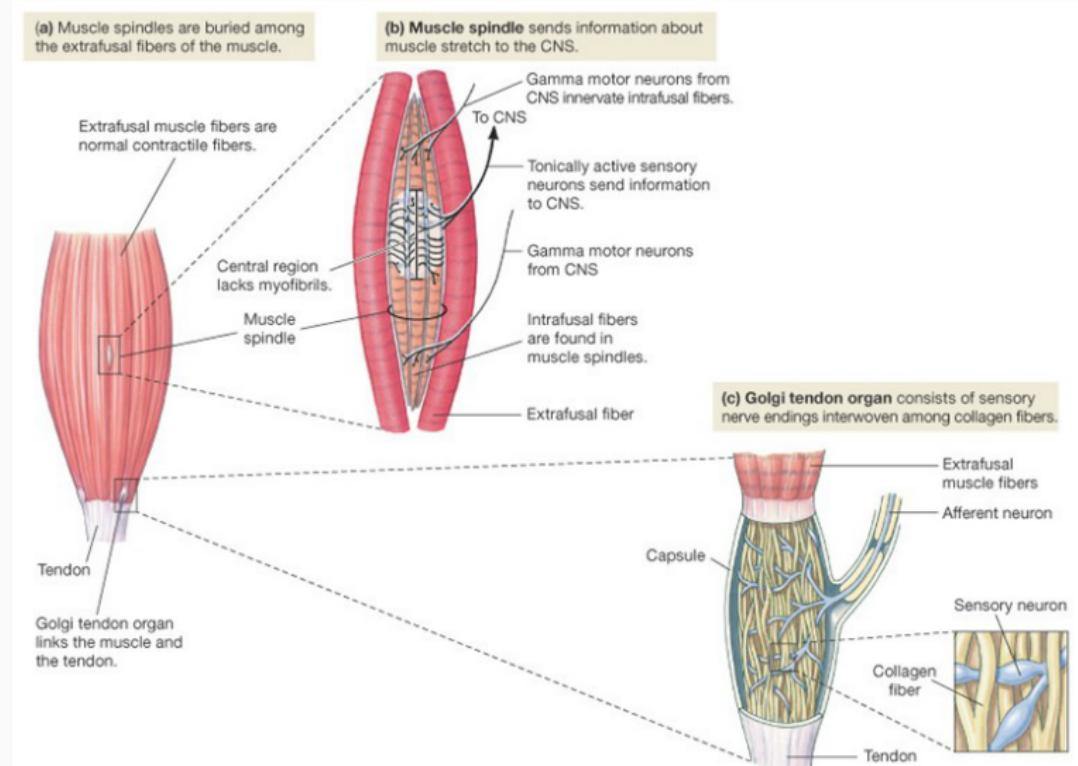


La perception Kinesthésique

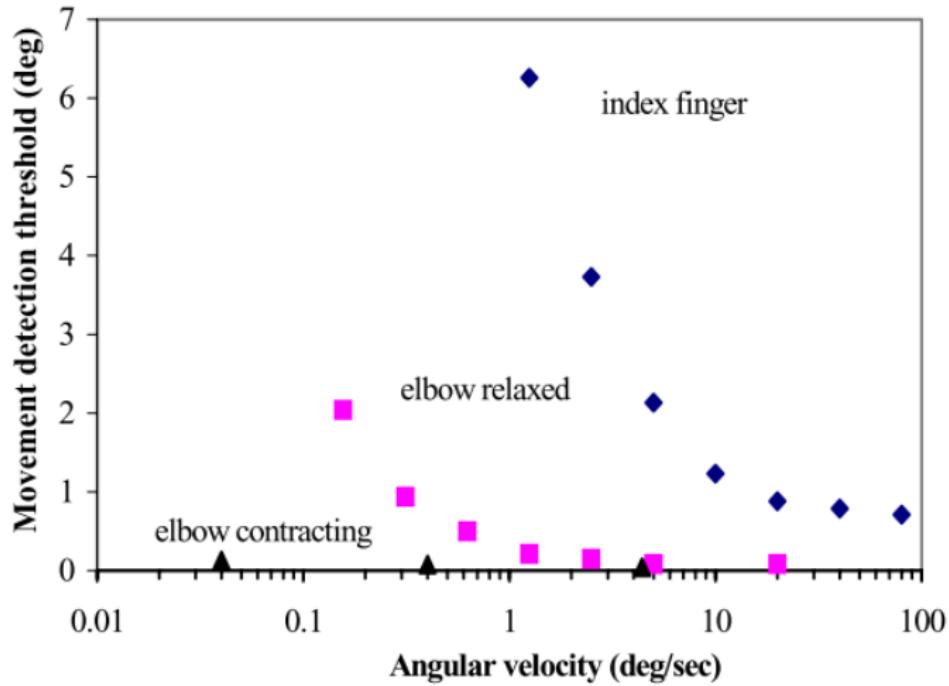
La perception kinesthésique

- Perception de la position des membres, du mouvement des muscles
- par extension : force, poids, inertie
- Récepteurs kinesthésiques
 - Fibres musculaires
 - Organes tendineux de Golgi
 - Mécanorecepteurs dans les articulations

La perception kinesthésique



La perception kinesthésique



La perception kinesthésique

Variable	Résolution	Seuil différentiel
Mouvement des membres	0.5-1°	8% (intervalle 4-9%)
Position des membres	0.8-7°	7% (intervalle 5-9%)
Force	0.06N	7% (intervalle 5-12%)
Rigidité	-	17% (intervalle 8-22%)
Viscosité	-	19% (intervalle 14-34%)
Inertie	-	28% (intervalle 21-113%)

Table 2 : Sensibilité kinesthésique

Illusions kinesthésiques

- Pseudo-haptique
 - illusion de retour de force
 - décalage entre mouvement et retour visuel attendu

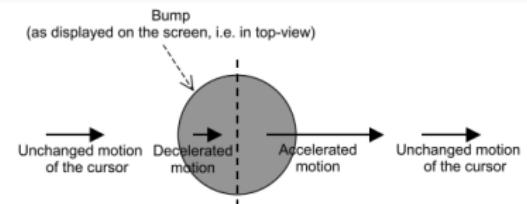


Figure 19 : [Lécuyer, 2009]

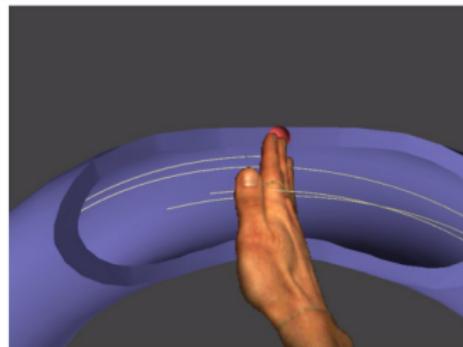
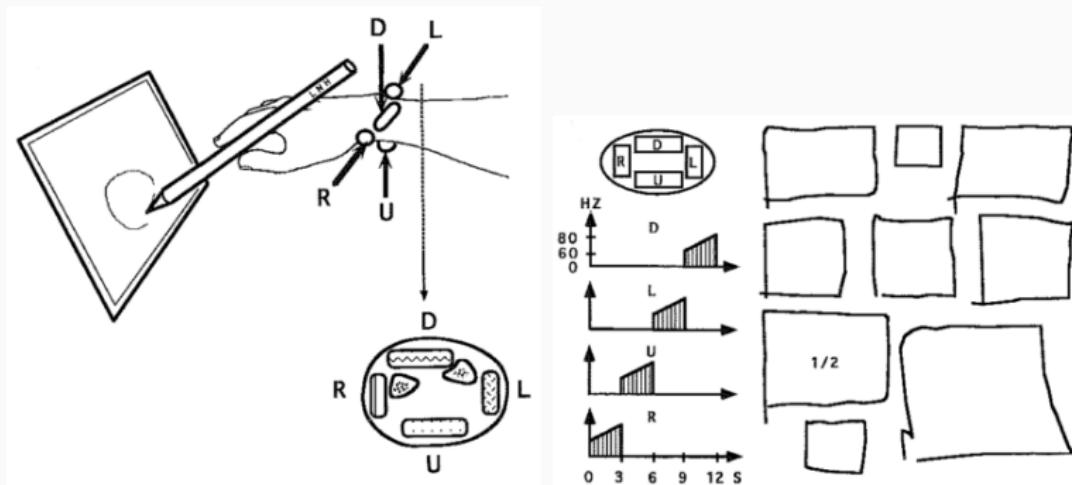


Figure 20 : [Pusch et al., 2008]

Illusions kinesthésiques

- Illusions de mouvement
 - vibration sur tendon



Interface classique : bras à retour de force

- Impédance (in : position, out : force)
- Admittance (in : force, out : position)



Figure 21 : ©3dsystems.com



Figure 22 :
[Van der Linde et al., 2002]

Interfaces Avancées

- Articulations complexes (ex : Sense glove, exosquelette)
- Simulation électrique des muscles (ex : Impacto)
- Espace de travail étendu (ex : SPIDAR)
- Proxy / props (ex : haptic PIVOT [Kovacs et al., 2020])
- <https://haptipedia.org> [Seifi et al., 2019]



Figure 24 :
[Lopes et al., 2015]

Figure 23 :
©senseglove.com

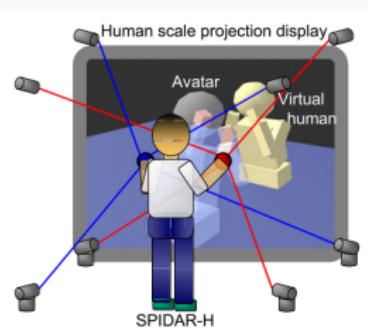


Figure 25 :
[Hasegawa et al., 2006]

Interfaces Avancées



PIVOT
on-demand handhelds in VR

Robert Kovacs, Eyal Ofek, Mar Gonzalez Franco, Alexa Fay Siu,
Sebastian Marwecki, Christian Holz, Mike Sinclair

Microsoft Research
UIST 2020

A person's arm wearing a black PIVOT on-demand handheld device, which is a cylindrical device attached to the forearm. The background is a plain white wall.

Rendu haptique

- Calcul des forces résultant de l'interaction de l'utilisateur avec des objets virtuels



Figure 26 : Flux de travail pour l'interaction haptique

- Algorithme de base (impédance)
 - Acquisition de la position de l'interface haptique
 - Analyse d'éventuelles collisions avec des objets virtuels
 - Si collision, calculer les forces de réaction
 - Reproduire ces forces sur l'interface haptique et mise à jour de la simulation
- Fréquence de mise à jour idéale : 1kHz

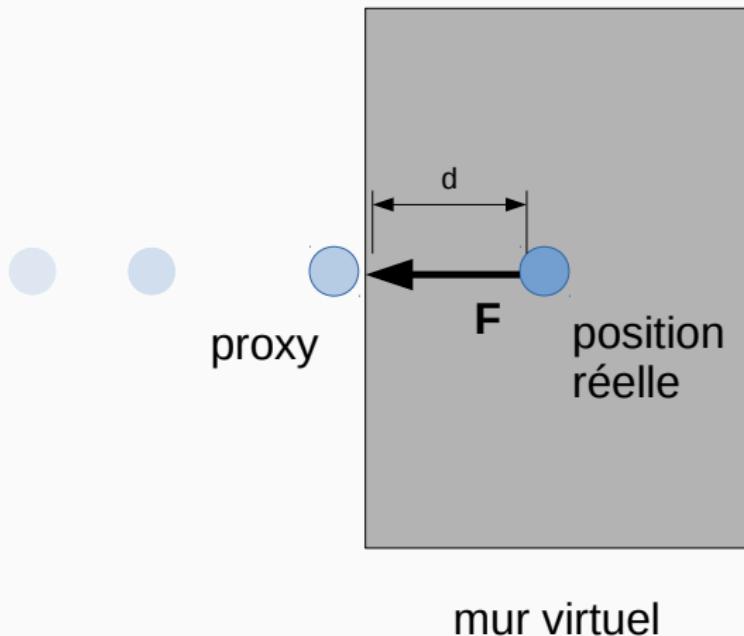
Rendu haptique - Principe de base

- Proxy contrôlé par bras à retour de force (impédance)
- Exemple pour 1 degré de liberté



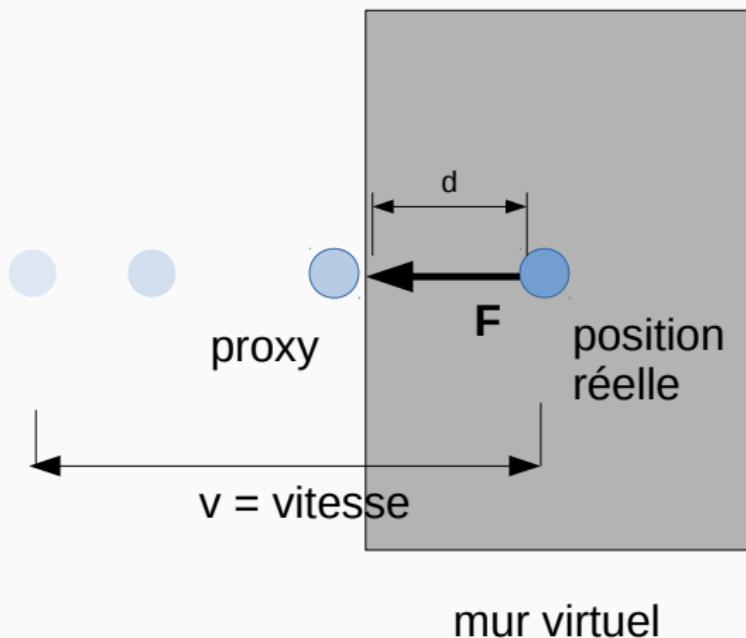
Rendu haptique - Principe de base

- Collision modélisée par un ressort
- $F = -Kd$, K = rigidité du mur (stiffness)



Rendu haptique - Principe de base

- Collision modélisée par un ressort et amortissement
- $F = -Kd - Bv$, K = stiffness, B = amortissement (damping)



Rendu haptique - Principe avancé

- Objets virtuels complexes
- 6 degrés de liberté



Figure 27 : ©geomagic.com

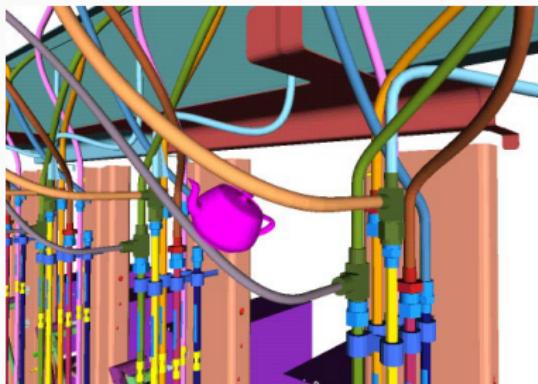
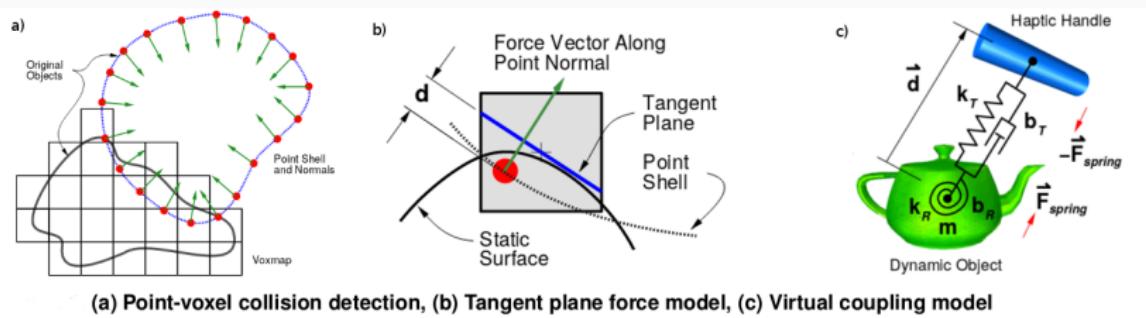


Figure 28 : [McNeely et al., 2005]

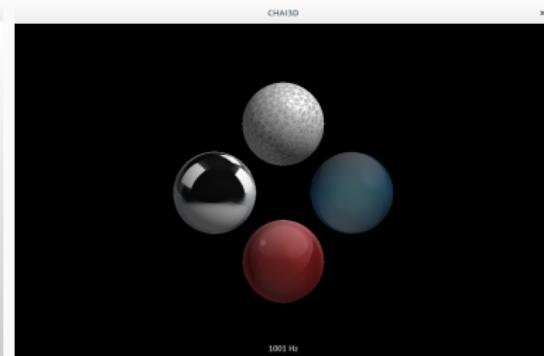
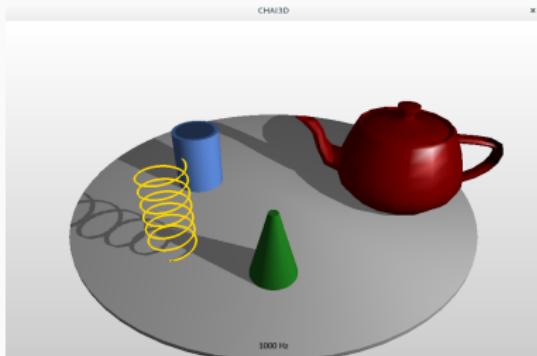
Rendu haptique - Principe avancé

- Découpage en "voxmap" et "pointshell"
- Détection des collisions et calcul des forces locales
- Calcul des forces liées au proxy



Demo

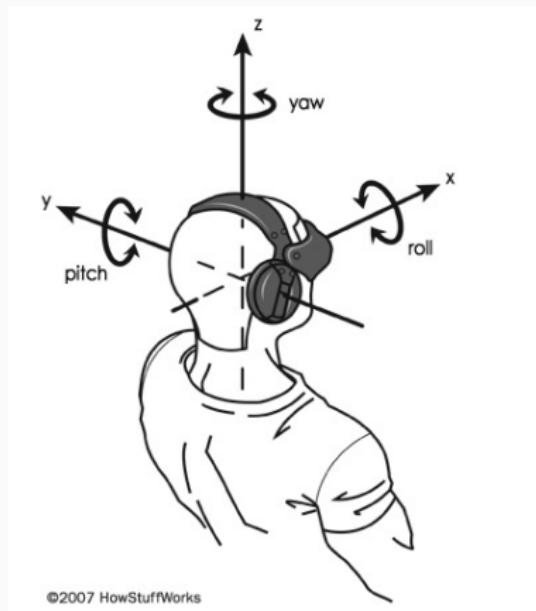
- Novint Falcon
- CHAI 3D API (C++)
 - Interaction avec des corps solides
 - Interaction avec des corps mous



Le sens du Mouvement

Perception

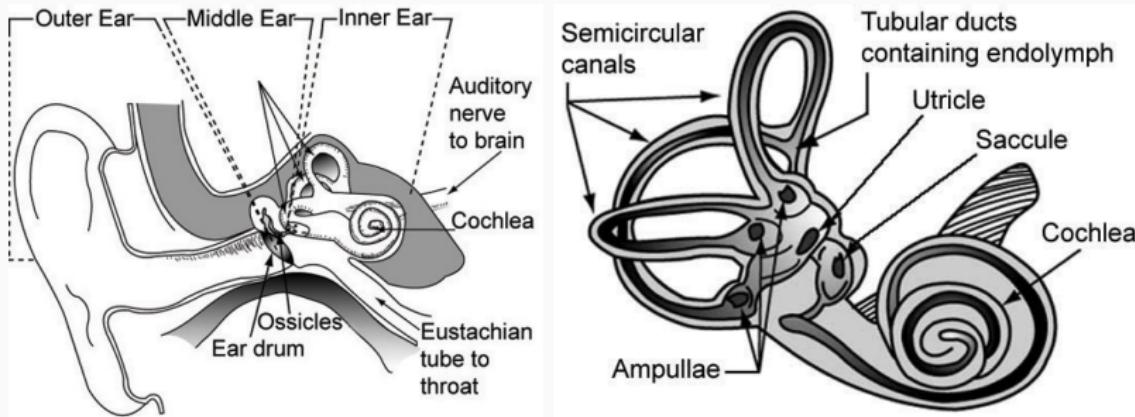
- Perception du déplacement du corps dans l'espace
- Système proprioceptif
 - Système vestibulaire
 - Sens haptique



©2007 HowStuffWorks

Perception - Système Vestibulaire

- 3 canaux semi-circulaires → vitesse angulaire
- 2 organes otolithiques → accélération linéaire
 - Saccule
 - Utricule



Illusions de mouvement

- Organes otolithiques sont sensibles à la gravité

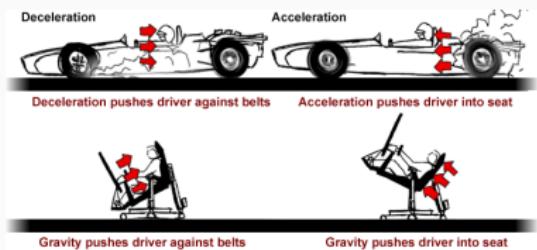


Figure 29 : ©force-dynamics.com

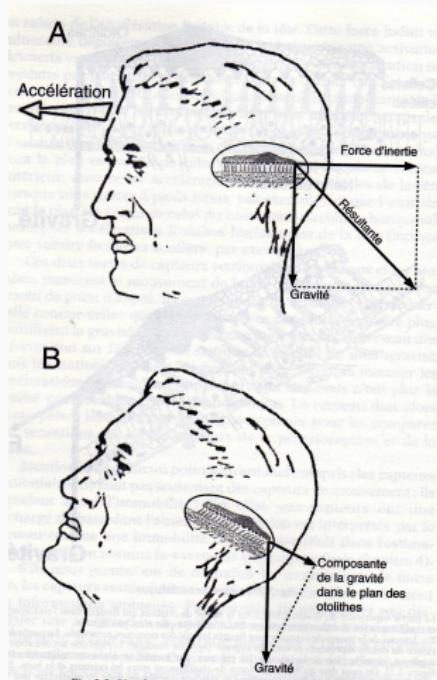


Figure 30 : [Berthoz, 1997]

Illusions de mouvement

- Vection : illusion de mouvement propre
- "Illusion du train"
- Provoquée par le système visuel



Figure 31 : [Riecke et al., 2005]



Figure 32 : ©Birdly - somniacs.co

Simulateur de mouvement

- Basé sur la plateforme de Stewart (hexapode)
- 6 degrés de liberté

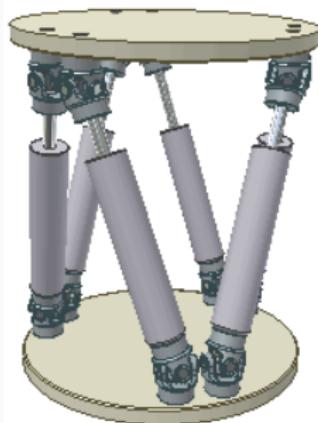


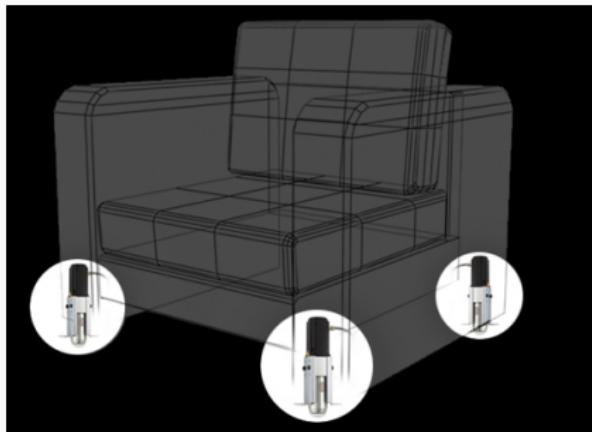
Figure 33 : ©Wikipedia.org



Figure 34 : ©Wikipedia.org

Simulateur de mouvement

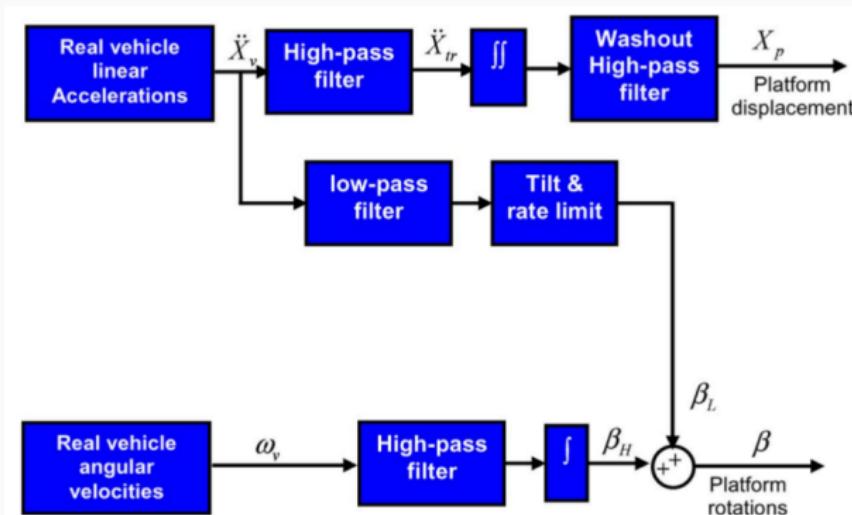
- Version simplifiée à 3 degrés de liberté
- Utilisée pour les "cinémas 4D"



Rendu de mouvement - Motion Platform

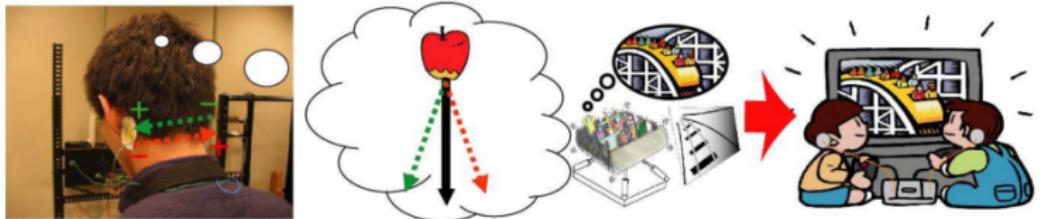
- Washout Filter

- in : accélération linéaires et vitesse angulaires
- out : position et orientation de la plate-forme
- rate limit : $3^\circ/\text{s}$



Autres simulateurs

- Stimulation galvanique vestibulaire
- Électrodes derrière les oreilles
- 1 degré de liberté

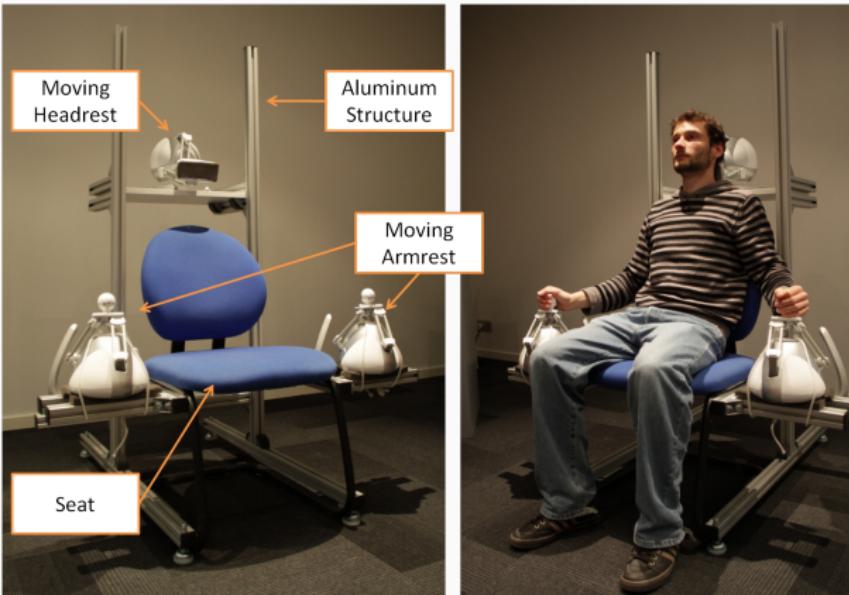


Autres simulateurs



Autres simulateurs

- HapSeat
- 6 degrés de liberté
- Retours de force locaux (tête et mains)



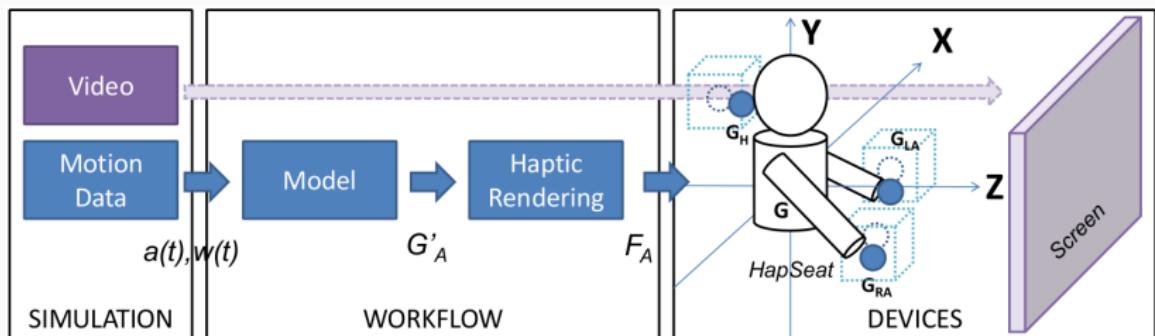
HapSeat: Producing Motion Sensation with Multiple Force-feedback Devices Embedded in a Seat

Fabien Danieau, Julien Fleureau, Philippe Guillotel,
Nicolas Mollet, Marc Christie, Anatole Lécuyer



Rendu de mouvement - HapSeat

- Mouvement décrit par accélération linéaires ($a^t = [x_c, y_c, z_c]^t$) et vitesses angulaires ($w^t = [\phi_c, \theta_c, \psi_c]^t$)
- Capturé par centrale inertuelle



Rendu de mouvement - HapSeat

$$\overrightarrow{G_A G'_A} = f(\vec{T}, \vec{R}) \quad (1)$$

avec

$$f(\vec{T}, \vec{R}) = \frac{\|\vec{T}\| \vec{T} + \|\vec{R}\| \vec{R}}{\|\vec{T}\| + \|\vec{R}\|} \quad (2)$$

et

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{R} = (R_x(m_x \phi_c(t)) R_y(m_y \theta_c(t)) R_z(m_z \psi_c(t)) - I_3) \overrightarrow{G G_A} \quad (4)$$

k, m = coefficients de réduction ; I_3 = matrice identité

Rendu de mouvement - HapSeat

$$\overrightarrow{GG'_A} = (R_x(m_x\phi_c(t))R_y(m_y\theta_c(t))R_z(m_z\psi_c(t))\overrightarrow{GG_A}) \quad (5)$$

i.e. :

$$\overrightarrow{G_A G'_A} = \overrightarrow{GG'_A} - \overrightarrow{GG_A} \quad (6a)$$

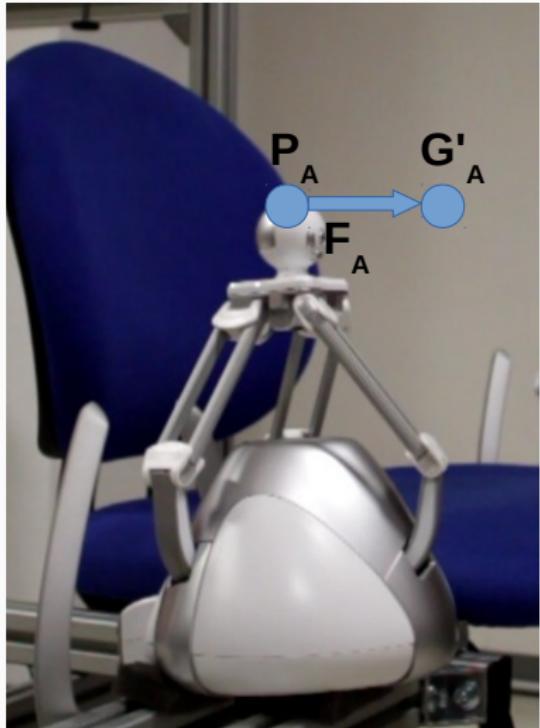
$$= (R_x(m_x\phi_c(t))R_y(m_y\theta_c(t))R_z(m_z\psi_c(t))\overrightarrow{GG_A} - \overrightarrow{GG_A}) \quad (6b)$$

$$= (R_x(m_x\phi_c(t))R_y(m_y\theta_c(t))R_z(m_z\psi_c(t)) - I_3)\overrightarrow{GG_A} \quad (6c)$$

Rendu de mouvement - HapSeat

- Novint Falcon = contrôle en impedance (force)
- Modèle donne une position
- Calcul de la force (modèle ressort-amortissement)
- $F_A = k(G'_A - P_A) - dV_A$

k constante de ressort, d constante d'amortissement



Conclusion

Conclusion

- Haptic : science du toucher
 - Perception tactile
 - Perception kinesthésique
- Sens du mouvement : perception de son corps dans l'espace
 - Perception haptique
 - Système vestibulaire
- Interfaces haptiques / Simulateur de mouvement
 - Appareils mécaniques qui stimulent ces systèmes perceptifs
- Algorithmes de rendu
 - boucles de contrôle des interfaces haptiques
- Multiples applications : médical, enseignement, jeu, réalité virtuelle, etc.

Conférences / Journaux / Ressources

- Haptique
 - Haptics Symposium
 - Eurohaptics
 - World Haptics
 - IEEE Transactions on Haptics
- IHM
 - UIST
 - CHI
 - SIGGRAPH
- Web
 - <https://twitter.com/HapticsClub>
 - <https://hapticsif.org>
 - <https://haptipedia.org/>

Merci!

Question?

fabien.danieau@interdigital.com

Bibliographie i

-  Abdur Rahman, M., Alkhaldi, A., Cha, J., El Saddik, A., and Rahman, M. A. (2010).
Adding haptic feature to YouTube.
In *ACM International Conference on Multimedia*, pages 1643–1646. ACM.
-  Alexander, J., Marshall, M. T., and Subramanian, S. (2011).
Adding haptic feedback to mobile tv.
In *CHI 2011 extended abstracts*, pages 1975–1980. ACM.
-  Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A., and Harrison, C. (2010).
Teslatouch : electrovibration for touch surfaces.
In *Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 283–292. ACM.

Bibliographie ii

-  Benko, H., Holz, C., Sinclair, M., and Ofek, E. (2016).
Normaltouch and texturetouch : High-fidelity 3d haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers.
In *UIST*.
-  Berthoz, A. (1997).
Le sens du mouvement.
Ed. Odile Jacob.
-  Choi, D.-S., Yun, I.-H., Kim, T.-H., Byeon, S., and Kim, S.-Y. (2020).
Development of haptic stylus for manipulating virtual objects in mobile devices.

Bibliographie iii

In *Actuators*, volume 9, page 30. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

-  Danieau, F., Fleureau, J., Guillotel, P., Mollet, N., Christie, M., and Lécuyer, A. (2012).

HapSeat : Producing Motion Sensation with Multiple Force-feedback Devices Embedded in a Seat.

In VRST'12, pages 69–76.

-  Dionisio, J. (1997).

Projects in VR Virtual Hell : A Trip Through the Flames.

Ieee Computer Graphics And Applications, pages 11–14.

Bibliographie iv

-  Hasegawa, S., Toshiaki, I., Hashimoto, N., Salvati, M., Mitake, H., Koike, Y., and Sato, M. (2006).
Human-scale haptic interaction with a reactive virtual human in a real-time physics simulator.
Computers in Entertainment (CIE), 4(3):9.
-  Hayward, V. (2008).
A brief taxonomy of tactile illusions and demonstrations that can be done in a hardware store.
Brain research bulletin, 75(6):742–52.
-  Israr, A. and Poupyrev, I. (2011).
Tactile Brush : Drawing on Skin with a Tactile Grid Display.
In *CHI 2011*, pages 2019–2028. ACM.

Bibliographie v

-  Johansson, R. and Westling, G. (1987).
Tactile afferent input influencing motor coordination during precision grip.
In *Clinical aspects of sensory motor integration*, pages 3–13. Springer.
-  Jones, L. A. (2000).
Kinesthetic Sensing.
Human and Machine Haptics, pages 1–10.
-  Klatzky, R. L., Lederman, S., Pellegrino, J., Doherty, S., McClosky, B., and Goodale, M. (1990).
Procedures for haptic object exploration vs. manipulation.
Vision and action : The control of grasping, pages 110–127.

Bibliographie vi

-  Kovacs, R., Ofek, E., Gonzalez Franco, M., Siu, A. F., Marwecki, S., Holz, C., and Sinclair, M. (2020).
Haptic pivot : On-demand handhelds in vr.
In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 1046–1059.
-  Lécuyer, A. (2009).
Simulating haptic feedback using vision : A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback.
Presence : Teleoperators and Virtual Environments, 18(1):39–53.

Bibliographie vii

-  Lee, J., Dietz, P., Leigh, D., Yerazunis, W., and Hudson, S. (2004).
Haptic pen : a tactile feedback stylus for touch screens.
In *Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 291–294. ACM.
-  Lopes, P., Ion, A., and Baudisch, P. (2015).
Impacto : Simulating physical impact by combining tactile stimulation with electrical muscle stimulation.
In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, pages 11–19. ACM.

Bibliographie viii

-  Maeda, T., Ando, H., and Sugimoto, M. (2005).
Virtual acceleration with galvanic vestibular stimulation in a virtual reality environment.
Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2005 (VR'05),
2005:289–290.
-  Mancini, F., Bauleo, A., Cole, J., Lui, F., Porro, C. A., Haggard, P., and Iannetti, G. D. (2014).
Whole-body mapping of spatial acuity for pain and touch.
Annals of Neurology, 75(6):917–924.

Bibliographie ix

-  McNeely, W., Puterbaugh, K., and Troy, J. (2005).
Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling.
In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*.
-  Mcneely, W. A., Puterbaugh, K. D., Troy, J. J., and Works, B. P. (2006).
Voxel-Based 6-DOF Haptic Rendering Improvements.
haptics-e, 3(7).
-  Nehaoua, L., Mohellebi, H., Amouri, A., Arioui, H., Espié, S., and Kheddar, A. (2008).
Design and control of a small-clearance driving simulator.
IEEE Transactions on Vehicular Technology, 57(2):736–746.

Bibliographie x

-  Pusch, A., Martin, O., and Coquillart, S. (2008).
HEMP-Hand-displacement-based pseudo-haptics : A study of a force field application.
In *3D User Interfaces, 2008. 3DUI 2008. IEEE Symposium on*, pages 59–66. IEEE.
-  Riecke, B. E., Schulte-Pelkum, J., Caniard, F., and Bülthoff, H. H. (2005).
Towards lean and elegant self-motion simulation in virtual reality.
In *Virtual Reality*, pages 131–138.

-  Roll, J. P. and Gilhodes, J. C. (1995).
Proprioceptive sensory codes mediating movement trajectory perception : human hand vibration-induced drawing illusions.
-  Salzer, Y., Oron-Gilad, T., and Ronen, A. (2007).
Thermoelectric tactile display based on the thermal grill illusion.
Proceedings of the 14th European conference on Cognitive ergonomics invent! explore! - ECCE '07, (August):303.

-  Seifi, H., Fazlollahi, F., Oppermann, M., Sastrillo, J. A., Ip, J., Agrawal, A., Park, G., Kuchenbecker, K. J., and MacLean, K. E. (2019).
Haptipedia : Accelerating haptic device discovery to support interaction & engineering design.
In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–12.
-  Sodhi, R., Poupyrev, I., Glisson, M., and Israr, A. (2013).
AIREAL : interactive tactile experiences in free air.
In *ACM SIGGRAPH*, volume 32.

-  Tan, H., Lu, I., and Pentland, A. (1997).
The chair as a novel haptic user interface.
In *Workshop on Perceptual User Interfaces*, pages 19–21.
-  Van der Linde, R., Lammertse, P., Frederiksen, E., and Ruiter, B. (2002).
The HapticMaster, a new high-performance haptic interface.
In *Proc. Eurohaptics*, pages 1–5. Citeseer.

-  Winfield, L., Glassmire, J., Colgate, J. E., and Peshkin, M. (2007).
T-PaD : Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction.
Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07), pages 421–426.
-  Yang, G.-h. and Kwon, D.-S. (2008).
KAT II : Tactile Display Mouse for Providing Tactile and Thermal Feedback.
Advanced Robotics, 22(8):851–865.

Copyright

La presentation est sous license
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International



disponible ici :

<https://github.com/FabienDanieau/coursHaptique>

utilise le thème : <https://github.com/matze/mtheme>