

瑞典轮式全方位移动机器人 运动学分析与控制

乔瓦尼因迪韦

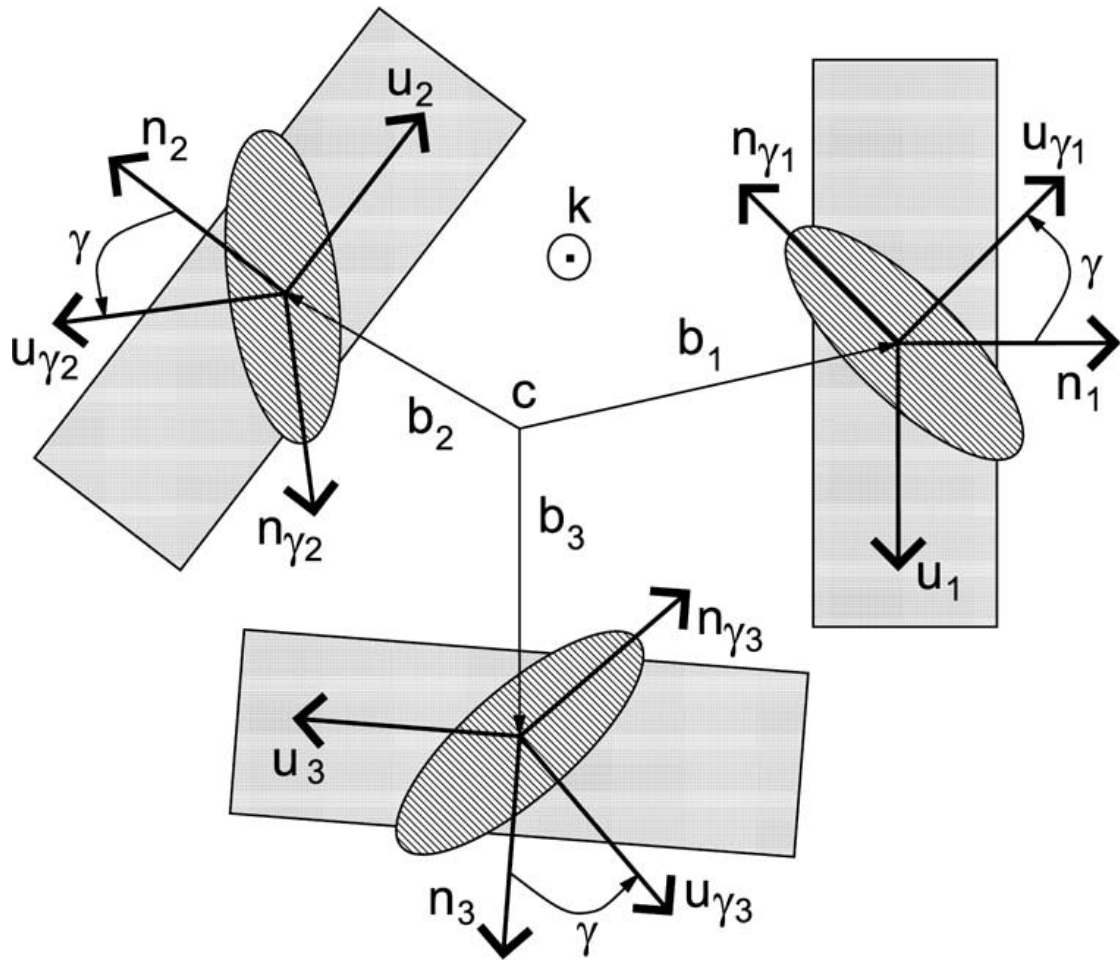
摘要瑞典轮式机器人已经收到了越来越多的关注过去数年。他们的
的动学模型有有趣的性质流动性和可能的条件奇点。本文所涉及
问题的运动学建模,奇异性分析和运动控制 1 通用汽车配备瑞典车
轮。

指数计算, 移动机器人运动学, 移动机器人, 运动控制,
轮式机器人。

一 引言

在过去的几年中, 瑞典轮式全方位移动机器人中得到越来越
多的移动机器人注意研究界。一家瑞典轮不同于普通轮事实上,
在滚筒安装在其周边(见图. 1)。如果所有滚筒平行, 彼此就错
位轮毂轴, 他们将提供额外的流动性程度, 对于一个传统的完美
滚轮。

如图所示的车轮。 1 是通常被称为 **mecanum** 或瑞典车轮:
其设计参数之一是之间的角 γ 辊轧制方向 **G** 和轮毂轴方向每小时
典型 γ 值= **45**, $\gamma = 0^\circ$, 如图所示。 1 (左, 右的情况下, 分别)。
请注意, 退化情况 $\gamma = 90^\circ$ 没有实际利益, 因为它将使传统的车轮
一样的流动性。



图。 2。 三轮 omnidrive 机器人： 几何模型

该单位向量 $\mathbf{n}$ 是赞同轴的主要车轮周长和 $\mathbf{u}$ 小时： $\mathbf{n}$ 的 $\hat{\mathbf{H}}$ 脑 $\mathbf{K}$ 表显示瞬时切线速度与旋转方向围绕相关的滚子 $\tilde{\mathbf{n}}$ 小时。所有的车轮被假定为相同，并具有相同的半径 r 。该机构在固定框架心连心轮位置记波黑。每个轮毂轴，即单位向量，单位向量车轮欽樾主要旋转轴，是指由尼克：新罕布什尔州 $= 1$ 。终于每个车轮，单位向量恩： $=$ 新罕布什尔州脑 $\mathbf{k}$ 是定义说明瞬间，作为一个后果轮切线速度方向其周围旋转的新罕布什尔州。请注意，参考图。 1，单位向量 $\mathbf{u}$ 纬 $\mathbf{h}$ 和新罕布什尔州将符合 $\mathbf{G}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别。在由于假设，所有的 $\mathbf{K}$ 例外推出向量平行地平面体育。

鉴于任何两个三维向量的组件 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 在共同正交框架，其载体的产品将被计算使用斜对称矩阵 $\mathbf{S}(\cdot)$ ，使得

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{S}(\mathbf{a}) \mathbf{b}.$$

VC 的调用这些机器人中心（如点线速度显示 $\mathbf{c}$ 的图。 2）和 ω_K 表的角速度矢量，速度矢量的 $\mathbf{V}_h$ 每一个全方位的轮毂中心将得到由 $\mathbf{v}_h = \mathbf{v}_c + \omega_K \times \mathbf{b}_h, h=1, 2, 3, \dots, N.$

考虑到通用心连心轮和目前的时间下降指数 H 为简谱记谱法清晰起见，在完美的滚动的情况下，的速度 $\mathbf{v} =$ 给出的 $\mathbf{V}_h$ (2) 将身体的实现滚筒旋转的车轮周围 $n\gamma$ 和周围旋转的翻译也就是说，假设 $n\gamma$ 和 n 是不对齐，即 $\gamma = (2v+1)90^\circ$ ，其中 v 是一个整数

$$\mathbf{v} = \alpha \mathbf{u} \gamma + \beta \mathbf{u}$$

这意味着

$$n^T \mathbf{v} = \alpha n^T \mathbf{u} \gamma n^T \gamma$$

$$\mathbf{v} = \beta n^T \gamma \mathbf{u}$$

因而

$$\mathbf{v} = n^T \mathbf{v} n^T \mathbf{u} \gamma \mathbf{u} \gamma + n^T \gamma \mathbf{v} n^T \gamma \mathbf{u} \mathbf{u}.$$

请注意，滚子自转引起周围第一届 $n\gamma$ 在右边的 (3) 是完全被动而车轮旋转引起周围上右边第二个任期 $n\gamma$ 假定为积极的汽车生产。新罕布什尔州 q 调用每小时角速度与在人体中固定帧心连心电机相关，在完美的滚动的情况下，与“联合”和绘图速度 q 在任何给定相应的速度 v 轮毂将给予

$$n^T \gamma \mathbf{u} n^T \gamma \mathbf{v} = \rho q$$

其中的贡献

$$nT_v uT_\gamma n uT_\gamma$$

在U v的方向已经明确承担不利于pq̇，如完善的滚动给予假说，它完全产生滚筒的被动轮换。代(2)回(4)，鉴于这uThnyĤ = -余弦的任何Hy，一得到

$$-1\cos \gamma nT_\gamma h v c + 1\cos \gamma nT_\gamma h S(bh) k \omega = \rho q̇$$

由所有的向量投影(5)一个共同的体与固定框架其第三轴等于K⊥磷，在termnTy和承(波黑)K的结果

$$nT_\gamma h S(bh) k = n\gamma xh by h - n\gamma yh bxh = -bTh_u \gamma h$$

总结，(5)可以作为通用组件解释逆微分运动学方程矩阵形式

M

$$_v c \omega = \rho q̇ \cos \gamma$$

M = -

$$n\gamma x_1 n\gamma y_1 bT_{1u} \gamma_1 n\gamma x_2 n\gamma y_2 bT_{2u} \gamma_2 \dots n\gamma x_N n\gamma y_N bT_{Nu} \gamma_N \in \mathbb{R}^N \times 3$$

智能道路网和 $Q' \in \times 1$ 是联合速度向量。方程(7)及(8)代表通用运动学模型[9]瑞典轮式车辆与N轮。相反，其他大多数模型介绍在文献中是相对固定的三，四个轮子的配置，他们让一个有充分详细的车辆运动学分析作为一种性能不仅辊轮毂定向y功能，但也相对轮位置。这种分析可能会非常有用的机械和控制系统的汽车设计

。

假设 COS 的 $\gamma = 0$ ，而 M 有等级 3，方程 (7) 可以用来计算所需的车辆速度为关节速度命令（及物动词光盘， ωd ）笔。特别是，下面的引理成立。

引理 1：由于瑞典的轮式移动机器人与 N 相同半径 ρ 满足 (7) 轮毂，任何需要的车辆速度（及物动词光盘， ωd ）笔可以实现通过使用适当的关节速度 $q \cdot d$ 如果且仅当下列所有条件成立：

C.1节COS的 $\gamma = 0$;

特别是， $q \cdot d = 1/\rho \cos \gamma M_{vc} \omega d$

在以前的条件C.1节或任何违反对应丰富的新石器时代晚期以一种不同的运动学奇异：侵犯的状况C.1节将对应的控制权力全部损失，而违反将丰富的新石器时代晚期的条件对应于一个可控的损失，对于任何输入 q' ，国家衍生物（室速的选择 ζ ， ω ）笔会唯一不能确定。矩阵 M 定义 (8) 可为 $M = [M_I$ 的马]分解，

其中 M_I 的 $\in$ 智能道路网及 $M_a \in \times 2 \times 1$ ，这样的IRN

$$M_I v c + M_a \omega = \rho q' \cos \gamma.$$

三.瑞典轮式制导控制

全方位的机器人

根据得到的运动学模型，轨迹跟踪和构成的通用装备机器人的运动控制问题监管with $N \geq 3$ Swedish wheels 得到解决。建议的解决方案，除了而一般的车轮数量， γ 值，车轮配置，联合速度饱和明确帐户。该控制问题是制定为指导控制问题，即联合 $\dot{q}^T H$ 的速度假设为控制输入和线性和机器人角速度 $\omega^T C$ 和满足（7）的产出。当然，在实践中，这种方法需要执行较低水位控制回路映射 $\dot{q}^T D$ 的驱动器的联合参考速度命令。

A: : 低水位控制设计

正如标准机器人运动控制架构[22]，低级别控制系统可以设计无论是在分散或集中在一个时尚。在前者情况下，每个驱动器是单独控制，一个典型的速度PID回路（作为实验验证本文报道），在后一种情况下，中央控制解决方案可以得出基于计算力矩（即反馈线性化）方法。

分散控制（或独立的共同控制）方法更简单：每个 Q 的 $\dot{D}$ 是作为参考信号使用的组件相应的PID调节器速度环，动态联轴器各执行机构被忽视。如果这种低层次的控制系统的（也就是说，每个驱动器速度伺服回路）正在迅速关于机器人动态导航之一，期望之间的联合速度滞后和真正的速度是微不足道的联合：在这种情况下，只要完美的滚动约束满意，themapping之间的车辆速度（及物动词 $\dot{q}$ ， ω ） T 和联合的速度将接近的系统的运动学模型（7）具有所需的（或指挥） $\dot{q}$ 在右边 d 的地方联合速度的真正联合速度 $\dot{q}$ 。

集中控制解决方案一般都是基于动态机器人模型[17，总。 12 页。493-502]，动态方程轮式机器人与瑞典作为一个几何描述

第二节具有以下结构：

$$I \ddot{q} + (C(\omega) + F) \dot{q} = \tau$$

与我 $\in$ 的 $IRN \times N$ 为正定惯性矩阵， $C(\omega) \in$ 智能道路网 $\times N$ 的斜对称矩阵科里奥利和离心力（ ωk 是机器人的角速度），男 $\in$ 的 $IRN \times N$ 的对角摩擦矩阵，智能道路网和 $\tau \in \times 1$ 的驱动力矩的载体。鉴于非对角矩阵的性质，我和 $C(\omega)$ 和依赖（7）从 $\dot{q}$ 的 ω ，（11）是非线性和耦合。然而，作为一般工作机器人机械手[22]，控制输入向量 τ 可以计算基于一个非线性状态反馈线性化（或计算扭矩）解决方案，即

$$\tau = (C(\omega) + F) \dot{q} + I \ddot{y}$$

引起（记得，我满级），线性模型和解耦

$$\ddot{q} = \ddot{y}$$

这可以被用来设计一个 $\ddot{Y}$ 闭环解决方案，以跟踪参考信号 $\ddot{q}^T D$ 鉴于计算力矩的解决方案明确规定的帐户系统的动态耦合计算预计将

表现出更好的跟踪性能，特别是高速和加速度

引用。不过，由于同时也体现了报道的实验结果，独立的联合解决方案似乎有足够的精确跟踪和定速简单的轨迹准确。此外，由于本研究的主要目的是验证一个驱动器速度在指导一级的管理策略，只有独立的联合低级别的控制解决方案（即执行器的PID速度伺服回路）实施。在下面，瑞典轮式机器人将被假定为有低层次的独立系统联合控制等实物，构成的轨迹跟踪和监管的问题将得到解决在指导水平，即，考虑到联合指挥速度 $\mathbf{q}_d$ 的控制输入和（及物动词 $\dot{\mathbf{c}}$ ，蝇）作为输出 $\mathbf{F}$ 根据纯粹运动学模型（10）。为了制订和轨迹跟踪造成监管的问题，下面的符号将用于：给定一惯性（全球）框架 $\check{\mathbf{G}} = (\mathbf{i}$ 和 $\mathbf{j}$ ， $\mathbf{k}$)的具有 $\mathbf{k} := (\text{我脑十})$ 鋤 $\mathbf{P}$ ，其中 $\mathbf{P}$ 是平面地板，参考（平面）的轨迹是一个微曲线在 $\mathbf{P}$

$$\mathbf{r}_d(t) = \mathbf{i}_r T_d(t) \mathbf{i}_- + \mathbf{j}_r T_d(t) \mathbf{j}_-$$

曲线与横坐标

$$s(t) := \int_{t_0}^t \|\dot{\mathbf{r}}_d(\tau)\| d\tau$$

和单位切向量

$$\mathbf{t}_d = \frac{d\mathbf{r}_d}{ds}.$$

运动学轨迹跟踪问题在于找到一个该系统控制律的输入 $\mathbf{q}^*\mathbf{d}$ 使得位置和航向跟踪误差

$$\mathbf{e}_r(t) := \mathbf{r}_d(t) - \mathbf{r}_c(t)$$

$$e\varphi(t) := \varphi_d(t) - \varphi(t)$$

收敛于零，与区局（吨）作为 G 中的地位一个参考点（例如，几何中心或心的机器人），璽（吨）的标题，璽 $\mathfrak{D}$ （吨）所需的参考方向。请注意，对于有独轮车或汽车类非完整车辆运动学模型，参考标题璽 $\mathfrak{D}(t)$ 是不是任意的，而是需要配合该轨道切线方向的单位向量运输署。相反，鉴于任何位置参考轨迹路（吨），瑞典的轮式车辆将可以自由地跟踪任意标题璽 $\mathfrak{D}$ （吨），这并不一定需要配合的 $\mathfrak{D}$ 标题。

的姿态调节问题是一个特殊情况的轨迹跟踪1时发生的位置和方向的引用常数，即当 $\dot{\gamma} = 0$ 和 $\dot{\varphi} \mathfrak{D} = 0$ 。

B:轨迹跟踪控制器设计

与先前推出的符号，根据审议系统（10） $\dot{\gamma} \text{区局（吨）} = VC$ 和 $\dot{\varphi} \text{（吨）} = \omega$ 作为机器人线性和角速度。假设条件的C.1和C.2引理1得到满足， $n \geq 3$ 时，马 $\perp$ 跨度（毫升）（可以是永远保证了机器人的几何设计合理），那么任何风险投资所需的机器人线速度 $= (\cdot, \cdot, 0)^T$ 和角速度 ωK 表是唯一映射到控制输入 $q \mathfrak{D}$ 如下

$$q \mathfrak{D} = q \mathfrak{D} l + q \mathfrak{D} a$$

$$q \mathfrak{D} l = \rho \cos \gamma M l v c$$

$$q \mathfrak{D} a = l \rho \cos \gamma M a \omega.$$

在进行了一次标准的办法，来解决轨迹跟踪问题，考虑李雅普诺夫候选函数

$$V = 12 e^T r K r e r + 12 e^T \varphi K \varphi e \varphi$$

与 $K_r \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 是一个对称正定（ $K_r > 0$ ）矩阵和 K_φ 积极的常数。

时间的V结果衍生

$$\dot{V} = e^T r K r (\dot{r} d(t) - v_c) + e^T \varphi K \varphi (\dot{\varphi} d(t) - \omega).$$

如果满足VC和 ω

$$v_c = \dot{r} d(t) + K r (r d(t) - r_c(t))$$

$$\omega = \dot{\varphi} d(t) + K \varphi (\varphi d(t) - \varphi(t))$$

那么时间将V的导数负定，即

$$\dot{V} = -e^T r K r K r e r - (K \varphi e \varphi)^2 < 0.$$

代（23）和（24）在（19）和（20），相应的联合命令结果的速度

$$\dot{q}^T d(t) = \dot{q}^T d_l(t) + \dot{q}^T d_a(t)$$

$$\dot{q}^T d_l(t) = 1/\rho \cos \gamma M_l \dot{r} d(t) + 1/\rho \cos \gamma M_l K r (r d(t) - r_c(t))$$

$$\dot{q}^T d_a(t) = 1/\rho \cos \gamma M_a \dot{\varphi} d(t) + 1/\rho \cos \gamma M_a K \varphi (\varphi d(t) - \varphi(t)).$$

在溶液中（26）是前馈条件组合比例到基准线速度和角速度和反馈长期的跟踪误差成正比。建议的解决方案可确保全局指数稳定的平衡=0， $e\varphi=0$ 的误差动态，从而（有力）解决轨迹跟踪问题。控制法（26）是两个贡献的总和：第（27）相对定位跟踪和第二（28）至抽穗期跟踪。它应值得注意的是，由于假设，马 $\perp$ 跨度，两个命令（27）和（28）不互相干扰，即 $\dot{q}$ 的分升贡献机器人的角速度和贡献 $\dot{q}$ 的大到机器人的直线速度都是空。

c:执行器饱和问题

派生控制律含蓄上述分析假定机器人实际上可以（并立即）执行任意 $\mathbf{Q}^*\mathbf{D}$ 不论它的规范。在实践中，执行器将不理想的：特别是，他们将有一个非空的响应时间和一个上上的绑定最大输出。至于响应时间而言，它必须是假设下级执行器伺服回路速度更快比指导（运动学）循环。这项规定是反映作为执行机构的权力和参考轨迹：设计选择前者必须充分具备的特定属性大惯性车辆，使车辆的最大加速度可远远大于最大加速度 $\ddot{\varphi}_d$ 参考（吨）以及 $\dot{\varphi}_d$ 次（吨）。至于车辆最大加速比超过最大加速度参考足够大，该运动的动态行为指导法律将被罚款。因此，正如其他任何运动学设计指导解决方案，该控制法应实施瑞典轮式车辆足够强大的执行机构方面在最大加速度 $\ddot{\varphi}_d$ 参考（吨）以及 $\dot{\varphi}_d$ 次（吨）。应一决定处理车轮打滑和侧滑现象[15]，[19]通过设计的动态模型（11基于运动控制器）该机器人，一个较低的水平控制回路为基础勾勒[动态由（12）]应该被添加到运动学的制导回路（如建议在[16]）。如需有关移动动态模型讨论机器人配备了瑞典的轮子，参考[17]或[13]和[18]，在这样一个模型来计算接近最优轨迹。至于执行器速度饱和，情况稍微复杂。鉴于比例控制律的性质（26），跟踪错误（无论是在位置或标题）或所需的参考速度可以随时将发生大的驱动器，足以达到它们的极限。调用 $q_{\max j} > 0$ ，最大绝对值执行器 j ，一个 $q_{\max j}$ 可能速度可以选择作为漏尿流率 $= (q_{\max j} \text{ 明季})$ ，其中 $j = 1, 2, \dots$ ，注不管收益 k 和 K_r ，取决于 $K_r \mathbf{D}$ （吨）， K 路（吨），呃（吨），或电子邮件 r （吨），

饱和度条件

$$-\dot{q} \cdot d_{-\infty} \leq \dot{q} \cdot \max$$

可能总是受到侵犯。请注意，虽然 $\dot{\varphi} \cdot \mathbf{D}$ （吨前馈信号）以及 $\dot{\mathbf{r}}$ 路（吨）可最终总是有界的，跟踪误差的初步条件不设计参数。因此，一个指挥 $\dot{\mathbf{q}} \cdot \mathbf{D}$ 的一由于超过无穷多的规范初始条件不能先验排除在外。

D: 跟踪器速度饱和的存在

执行器速度饱和的存在严重影响 性能：考虑，特别是添加剂结构（26），执行器 速度饱和度可以影响角之间的解耦指挥 和 马的事实并不尽管线性车辆速度 属于跨ofMI。参考（26），假设，例如， 所有部件的 $\dot{\mathbf{Q}}$ 分升（吨）范围内执行机构，但 由于增加 $\dot{\mathbf{Q}}$ 达（吨后果），有些整体指挥 联合速度 $\dot{\mathbf{q}} \cdot \mathbf{D}$ （吨）超过限额的执行机构。在这种情况下，无论是 机器人指挥的线性和角速度会被破坏的一 不可预知的方式。甲（已知）快速和肮脏的出路这个问题 可以简单地缩小 $\dot{\mathbf{q}} \cdot \mathbf{D}$ （吨），使得其所有组成部分 是在可接受的范围。这当然，永远保证 该联合指挥速度是适当的范围内，但 人会需要证明，这种策略并不危害 渐近稳定的跟踪误差为零。此外，在许多 应用程序，它可能发生，要么直线或角速度命令 可能有最高的优先权。在这种情况下，缩减 整体联合司令部将有放缓的负面影响 收敛的最高优先任务，因为存在速度在低优先级之一。为了应付这个问题，并保证一个优先的位置和方向的执行跟踪任务，下面所提出的控制法修改建议：在

概括 (26) 应与加权错误和参考依赖 权重, 使得: 1) 所产生的 $q^i d$ 命令的执行机构已 normwithin

限制; 2) 任务 (位置和航向跟踪本案) 的执行的一个基于优先级的时间顺序 (高优先级任务第一); 和 3) 的跟踪误差收敛到零。

考虑饱和函数

$$\sigma : \mathbb{R} \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\sigma(x, c) = \begin{cases} 0, & \text{if } x = 0 \\ 1, & \text{if } 0 < |x| < cc/|x|, \end{cases}$$

否则

以下, 对 σ nonnegativesecond 参数 c (十, 三) 会被称为 X 的能力。请注意, 根据定义, σ (十, C) 的根本一个非负标量比例因子, 使 $x\sigma$ (十, 三) 是“剪切”, 以 c 标志 (十) 每当 $|x|$ 应该超过容量 C 和等于 x 否则, 即 $x\sigma$ (十, 三) 仅仅是饱和的版本在 x 范围 $[-C \text{ 语言}, C]$ 。还要注意的, 就其定义

$$\sigma(x, 0) = 0 \quad \forall x$$

即如果 x 应分配零能力, 然后 $x\sigma$ (十, 0) = 0 任何 x 的值假设

$$q^i d = _nh = 1q^i h$$

是具有 $Q^i 1$, $q^i 2$, 执行机构的投入。 。 。 , $q^i N$ 还 N 独立工作的投入通过减少与增加指数 (问^一有最高的优先排列优先级)。每对右边的长期 (32) 和 $q^i D$ 本身应有无限 normbounded 由 Q 最大。考虑到每个任务应在一个优先的方式执行, 在总结 (32) 可能被替换遵循了一个加权总和为:

$$q^i d = q^i 1 \sigma (_q^i 1 _ \infty, c1)$$

$$+ q^* 2 \sigma (-q^* 2_{-\infty}, c2)$$

+

...

$$+ q^* n \sigma (-q^* n_{-\infty}, cn)$$

其中每个任务的能力，动态递归计算为

$$c1(t) \leq q^* \max(\text{positive constant, i.e., } c^*1(t) = 0)$$

$$c2(t) = c1 - q^* 1_{-\infty} \sigma (-q^* 1_{-\infty}, c1)$$

$$c3(t) = c2(t) - q^* 2_{-\infty} \sigma (-q^* 2_{-\infty}, c2(t) \dots = \dots$$

$$cn(t) = cn-1(t) - q^* n-1_{-\infty} \sigma$$

$$(-q^* n-1_{-\infty}, cn-1(t)).$$

请注意，为建筑，以前所有的任务的能力是非负，即

$$cj \geq 0 \quad \forall j \in [1, n]$$

而

$$cj \leq cj-1 \quad \forall j \in [2, n]$$

$$ci = 0 \Rightarrow cj = 0 \quad \forall j > i$$

即如果一个给定的任务是分配零能力，所有的低优先级任务也将自动获得零的能力和他们的所有的重量在总结(33)将是零。我的任务的能力可以被视为作为高优先级的任务后，我-1剩余容量已指挥，因此，举例来说，C2的将是零（以及终审法院首席法官：j>2）每一个任务将是指挥一个非空的重量只有较高优先任务不饱和。事实上，C1应不超过q*最大的原因是事实，不应只是任务1饱和执行器流量Q*最大;此外，鉴于终审法院首席法官1∀j

$\in \leq c_j$ 型 $[1, n - 1]$ 中, $\leq q^*$ 条件 c_1 的最大保证每个总和 (33) 的任期将具有无穷规范小于或等于阈值 q^* 最大。一个证明

(33) 和 (34) 也意味着

$$\| \dot{q} \|_{\infty} = \max_{h=1, \dots, n} \| \dot{q}_h \|_{\infty} \leq q^*_{\max}$$

报道中的附录。为了落实上述在目前的架构描述轨迹跟踪的情况下, 假设参考前馈线性和角速度有足够小, 即

$$\| \rho / \cos \gamma \|_{\infty} \| \dot{r} \|_{\infty} < 1/2 q^*_{\max} \quad \forall t$$

$$\| \cos \gamma \|_{\infty} \| \dot{\varphi} \|_{\infty} < 1/2 q^*_{\max} \quad \forall t.$$

这些条件是必要的, 以保证跟踪任务渐近可行的, 即当位置和航向跟踪误差为空, 该控制律 (26) 是控制工作兼容的驱动器速度饱和的限制, 即

$$e_r = 0, \quad e_{\varphi} = 0 \Rightarrow$$

$$\| \dot{q} \|_{\infty} = \| \rho / \cos \gamma \|_{\infty} \| \dot{r} \|_{\infty} + \| \cos \gamma \|_{\infty} \| \dot{\varphi} \|_{\infty} \leq 1$$

$$\rho / \cos \gamma \| [\| \dot{r} \|_{\infty} + \| \dot{\varphi} \|_{\infty}] < q^*_{\max}.$$

为了清楚起见, 假设指定位置跟踪最高优先项目方面的跟踪。以下是定义:

$$q_1 := \rho \cos \gamma \| \dot{r} \|$$

$$q_2 := \rho \cos \gamma \| K_r (\| r \| - r_c) \|$$

$$q_3 := \rho \cos \gamma \| \dot{\varphi} \|$$

$$q_4 := \rho \cos \gamma \| K_{\varphi} (\| \varphi \| - \varphi_c) \|^2$$

有了这些定义, 认为管制法 (33) 和 (34)

$$c_1(t) = q_{\max} > 0 \quad \forall t$$

连同可行性条件 (36) 意味着

$$0 < 12q_{\max} \leq c_2 \leq q_{\max}$$

也就是说，任务1和2总是有非空的能力。此外，通过假设

羧尿[(36)]和 $C_1 = Qr$ 流率，它遵循该

$$q_1 \sigma(-q_1 - \infty, c_1) = q_1 \quad \forall t.$$

这与假设，马1跨度（毫升）一起事实意味着到了代 (38) -

(41 (33) 和 (34)，车辆将有由于采用线性和角速度

$$v_c(t) = r d(t) + K r e r(t) \sigma(-q_2 - \infty, c_2)$$

$$\omega(t) = q d(t) \sigma(-q_3 - \infty, c_3) + K \varphi e \varphi(t) \sigma(-q_4 - \infty, c_4).$$

由于这一事实，即 C_2 是严格正。所以

$$V_1 = 12eTrKr e r \Rightarrow$$

$$V_1 = eTrKr (r d(t) -$$

$$v_c(t)) = -eTr$$

$$Kr Kr e r(t) \sigma(-q_2 - \infty, c_2) < 0$$

即五1负定从而证明是全球李雅普诺夫渐近稳定 $\dot{V}_1 = 0$ 。请注意，第三季度以及第四季度无助于 V_1 的，因为属马的范围是正常的MI的跨度。据作为中学（项目）的任务而言，也可以衔接通过李亚普诺夫证明论点。全球渐近稳定 $\dot{V}_1 = 0$ 的保证他们

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q_2(t) = 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} c_3 = c_2 \geq 12q_{\max}.$$

鉴于可行性条件 (37), 这意味着

$$\exists t^* : q^3 \sigma(-q^3 - \infty, c_3) = q^3 \text{ and } c_4 > 0 \quad \forall t \geq t^*$$

这意味着

$$\omega(t)/t \geq t^* = \dot{\varphi}d(t) + K\varphi e\varphi(t) \sigma(-q^4 - \infty, c_4)$$

这C4是严格吨正面吨因此吨鉴

$$V_2 = 12 eT\varphi K\varphi e\varphi \Rightarrow$$

$$V_2(t) \text{---} t \geq t^* = eT\varphi K\varphi (\dot{\varphi}d(t) - \omega(t)) = -eT\varphi K\varphi e\varphi(t) \sigma(-q^4 - \infty, c_4) < 0$$

即存在一个有限的时间 t^* 之后的时间导数 V_2 的总是负面的, 从而证明收敛到零的标题错误 $e\varphi$ (吨)。此前吨*, 标题(次要任务)错误 $e\varphi(t)$ 是不保证在减少。请注意Q 1和Q`2, 在范围为M, 和正常的马, 不利于`V 2的。如果标题中应选择是最优先的任务, 这将足以选择q1

$$q^1 := 1 \rho \cos \gamma Ma \varphi^d(t)$$

$$q^2 := 1 \rho \cos \gamma Ma K\varphi e\varphi($$

$$q^3 := 1 \rho \cos \gamma Ml \dot{r}d(t)$$

$$q^4 := 1 \rho \cos \gamma Ml Kr er(t)$$

在(33)和(34);李雅普诺夫错误的标题和渐近稳定性的定位误差可收敛相应证明。至于固定姿势的控制, 轨迹跟踪问题沦为构成(位置和方向)规例一, 尽快作为参考的位置和航向轨迹次(t)和 $\varphi d(t)$ 是常数。

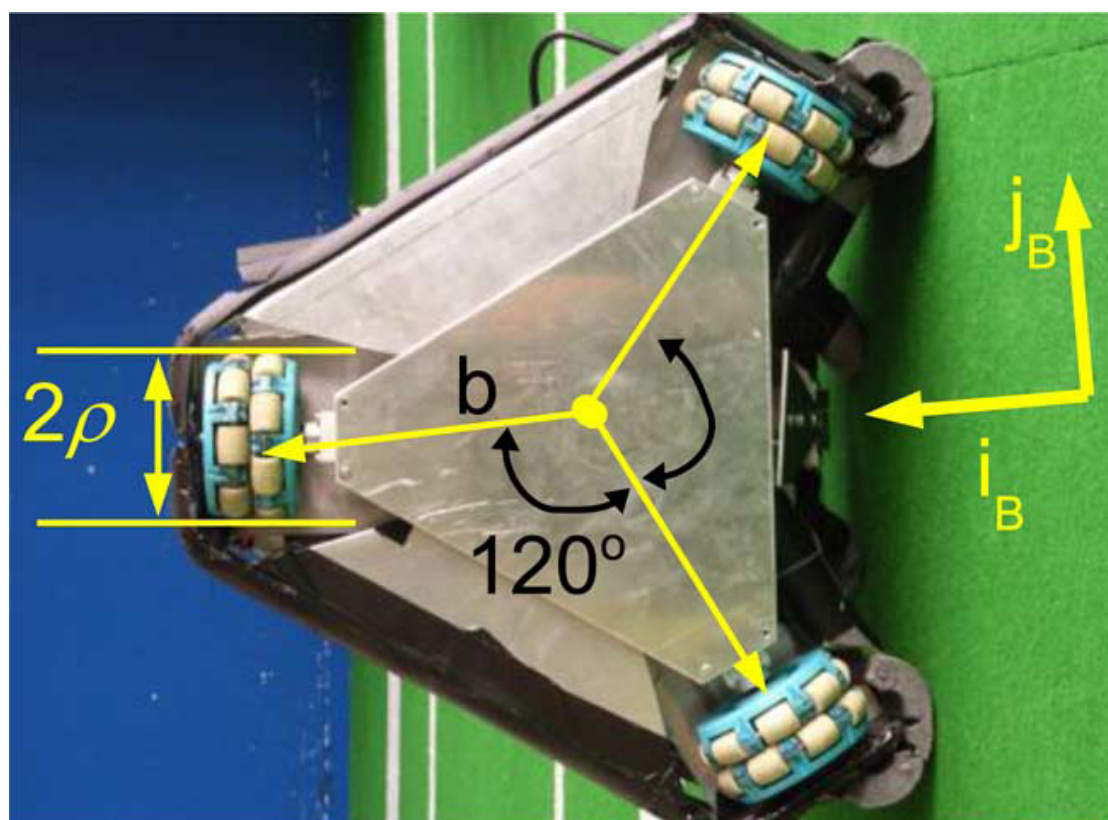
四。实验验证

在存在的轨迹跟踪制导规律描述饱和执行器的速度进行了实验验证瑞典在3轮机器人与纬= 0 鉞和蚁= 5厘米[20], [21]。该机器人名为Volksbot, 一直在设

计和建造德国弗劳恩霍夫研究所自主智能系统 (AIS) 的对圣一奥古斯丁, 德国。车辆欽樑几何描绘图。三是这样的双向=北京= 25 cm的所有 i, j 的这意味着马鋤跨度 (毫升)。

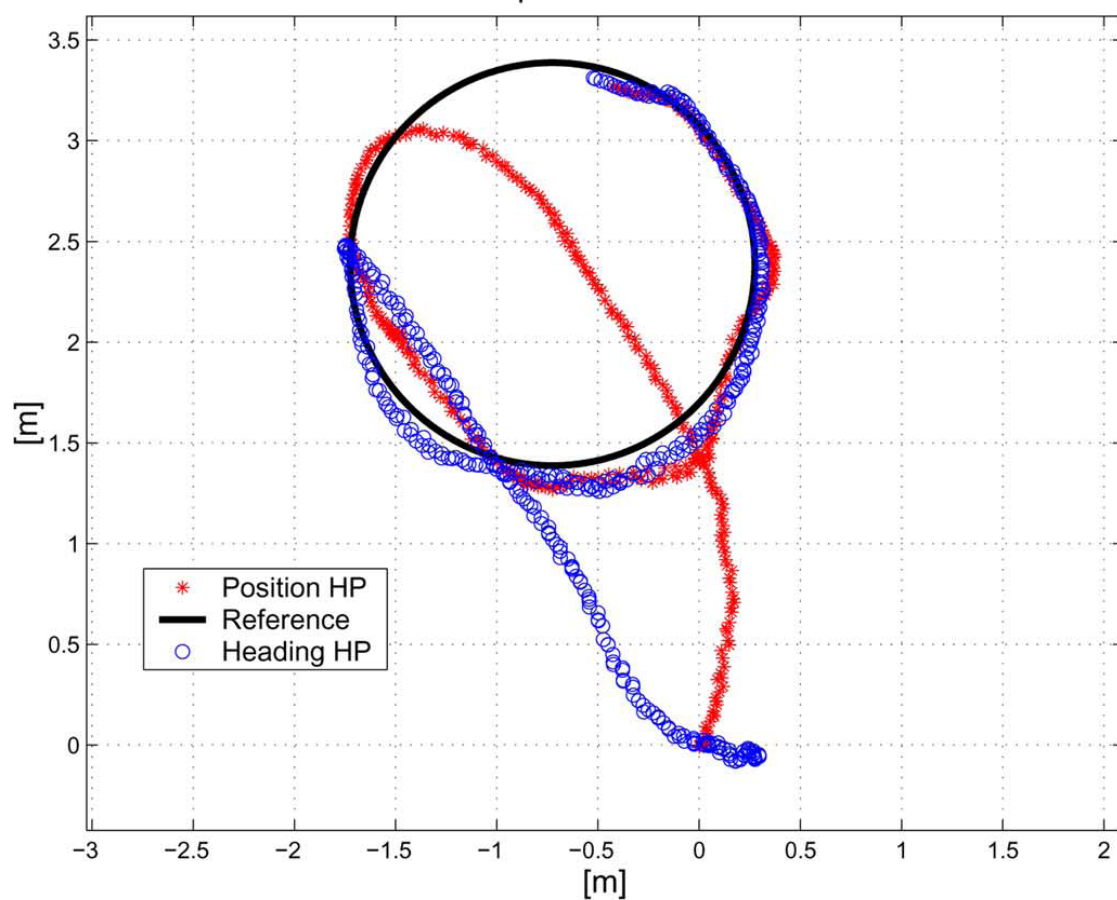
该平台是由三个驱动24伏直流电动机的90W each 1:8 齿轮比, 大约为8公斤重。光学编码器安装

1Ais已与另一弗劳恩霍夫研究所合并导致新德国弗劳恩霍夫研究所智能分析和信息系统 (成为会员)。

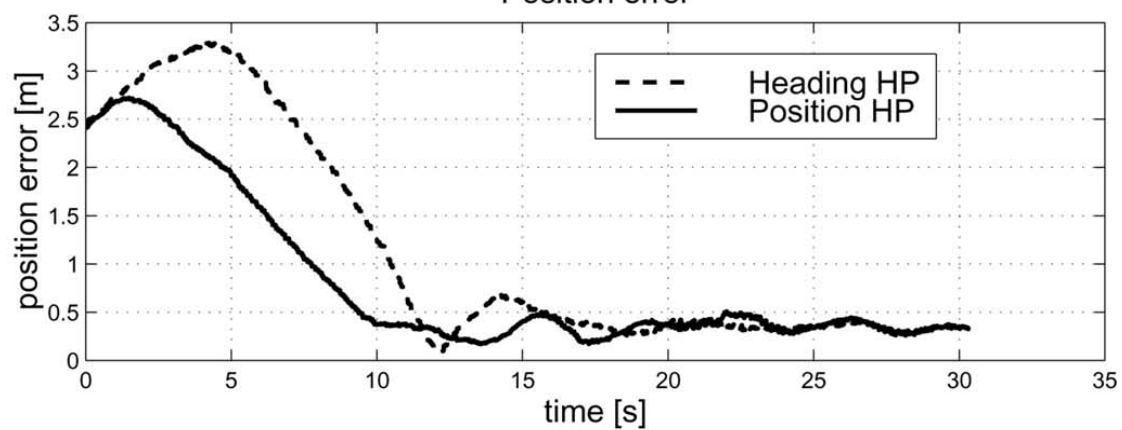


图。 3。几何模型的实验验证所使用的Volksbot机器人的轨迹跟踪控制律。

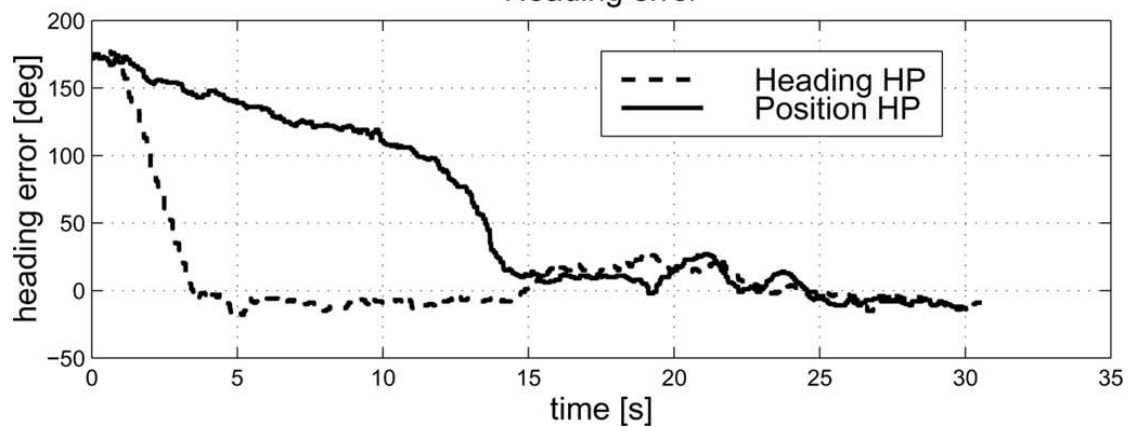
Robot path and reference



Position error



Heading error



图。 4。实验结果：驱动路径和跟踪误差。最高当务之急是要始终显示在收敛尽管速度较低的优先执行器速度饱和的原因。

每个电机轴为电机的速度调节器的反馈。该控制系统结构是相当标准：它有一个外部运动学闭环对低级别的驱动器速度伺服回路。特别是低级别的电机转速反馈控制实现由三通道数字PID董事会（TMC200设计和建造在认可机构）与脉宽调制（PWM）输出。最高连续电流提供的TMC200板每个电机一个峰值为20与甲TMC200是接口板值8通过与板载笔记本电脑实现串行RS232链接指导和导航系统。该导航系统，提供该机器人的估计构成用于关闭制导控制回路是基于里程计一体化和全方位视野系统。这建立在一个30赫兹， 640×480 像素的YUV色彩火线相机朝着70毫米直径的双曲指着镜子

为了验证所设计的轨迹跟踪性能 控制律，一个机器人的构成 ismandatory reliable measurement。 在这个意义上，设计了一种实验装置在AIS的地方位置 该机器人是由一个固定的测量激光测距取景器指向 对机器人。该机器人的标题，而是进行了评估的基础上 机载全方位视觉系统。参考位置和 标题进行跟踪，所有收集到的数据进行适当的同步。 对实验结果的例子有报道图。 4：地位的提法有圆形轨道半径为1米，而标题中提到不断就某一固定的框架（）。该 报告的结果是指任何情况下，标题（47） - （50）或 位置（38） - （41）跟踪是高优先级（惠普）的任务。该参考轨迹设计的可行性，以便满足条件（36）和（37），以及机器人的初始条件进行了明确选择足够

大，速度饱和和执行器触发：由于对实验装置的限制，致动器被人为地强迫浸透在 ± 8.7 弧度/通过低级别的控制软件（对应 s 到最大机器人线速度和角速度约0.5米/秒 和99.7°/ s的分别）。正如所料，既标题和位置误差 总是渐近收敛到零（**besidesmeasuring**错误可见在错误情节），但与惠普的任务总是收敛第一。 请注意，越来越多的位置误差（也当位置跟踪 具有最高优先级）在实验的最初几秒钟非常一个被忽视的车辆动力学后果。

五，结论

一个普通运动学模型的N瑞典轮式车辆推导和分析。经过处理然后瑞典轮的情况下，结果让提供统一的分析三和四轮，通常是分开进行设计。此外，派生的分析，可以立即和简单应用的探索，例如，最终六轮设计的户外和粗糙地形应用程序或转向（即，变方向）车轮设计，如[12]，即**allowthe**实施无级变速器（无级变速器）系统。

轨迹跟踪的运动控制驱动器存在的问题速度饱和度已得到解决。联合速度饱和始终存在，并可能严重影响性能的议案控制解决方案。的创意和建议的解决方案的相关性是关系到执行器的处理速度饱和的限制。所设计的解决方案，保证每个任务关节速度命令整体指挥和关节速度有上界无穷范数与每个驱动器兼容的限制。这是通过动态分配控制努力，根据自己的任务优先。相反，标准的任务为基础的控制，存在的与速度饱和度较低级别的任务不损害执行高优先级的。全局收敛的跟踪错误已经从理论上证明和实验验证

未来的研究将致力于扩展建议饱和和动态为基础的低层次的案

件管理技术控制和解决方案的推广在案件多冗余机器人系统的任务。

承认

笔者对此深表感谢皮克特等“奥热尔以及J.保卢斯波恩莱茵西格大学应用科学的圣Augusting，德国有益的讨论，并因开发了安装程序所提出控制律的实验验证。笔者也感谢他们的意见匿名评论

附录

证明声明35

证明文件，以符号紧，酒：定义

$$.q^j j_{\text{def}} = _q^j j _ \infty \sigma _ _q^j j _ \infty , \ c j _$$

. 然后，总结过去的N - 1方程（34）对于j = 2, 3,。 。 。 ,
n, 则以下条件成立：

$$_n j = 2 c j = c 1 + _n l = 2 c l - c n - _n - 1 k = 1 . q k \Rightarrow$$

$$c 1 = c n + _n - 1 k = 1 . q k \geq _n k = 1 . q k$$

因为架CN≥⁻拟牛顿。察觉到（33）意味着

$$_q^j d _ \infty \leq _n h = 1 . q h$$

52) 和方程组第一（34）暗示

$$_q^j d _ \infty \leq c 1 \leq q^j \max .$$